

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

KAVITACE V ARMATUŘE
CAVITATION IN THE ARMATURE

Student:

Bc. Jan Pavelčák

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Jablonská Ph. D.

Ostrava

2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Pavelčák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: Kavítace v armatuře
Cavitation in the Armature

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte teorii kavítace, definujte matematické modely kavítace.
2. Navrhněte měřicí zařízení a proveďte měření.
3. Stanovte metodiku měření kavítace.
4. Vytvořte geometrii a navrhněte vhodnou síť pro modelování
5. Otestujte matematické modely na 3D geometrii daného prvku.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOZUBKOVÁ, M.: *Matematické modely kavítace a hydraulického rázu*. Monografie. Ostrava: VŠB-TU, 2009, 130 s., ISBN 978-80-248-2043-9.
- [2] NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Kavítace v hydraulických strojích a zařízeních*. SNTL Praha, 1989, 336 s., 1.vydání.
- [3] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TU, 2008, 154 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM)
- [4] ČSN EN 1267 Průmyslové armatury – Měření průtokových ztrát s použitím vody jako zkušební tekutiny. Srpen 2012.
- [5] ČSN EN 60534-2-3 Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy. Prosinec 1999.
- [6] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. s.r.o., 2002, 204 s.
- [7] SINGHAL, A. K., ATHAVALE, M. M., LI, H., JIANG, Y.: Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. In *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 124, 2002, p. 617-624.
- [8] ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [9] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

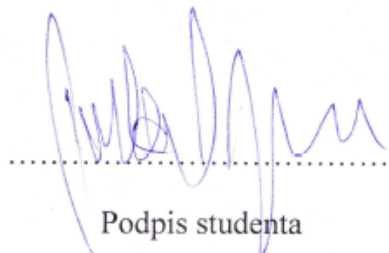


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Mistopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2014



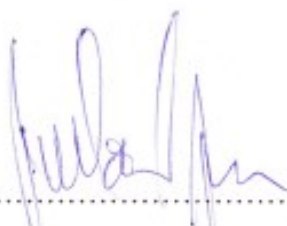
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se úplně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19. 5. 2014



Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAVELČÁK, Jan. *Kavitace v armatuře*. V Ostravě: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB-TUO, 2014. 60s. Diplomová práce.

Diplomová práce je zaměřena na měření kavitace v regulační armatuře dodané výrobcem ARMATURY GROUP a.s. V práci je obsažena rešerše na téma kavitace v regulačních armaturách vypracována na základě rozsáhlého množství zdrojů. Byl sestaven hydraulický obvod pro měření regulačních armatur, na kterém byl zjištěn součinitel regenerace tlaku FL. Následně byly pro konfiguraci numerické simulace v programu FLUENT proměřeny průtokové charakteristiky p-Q při malých zdvizích armatury. V průběhu tohoto měření bylo dosaženo pouze počáteční kavitace. Závěr práce uvádí grafické srovnání simulace s měřením a dopočteným kavitačním indexem.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

PAVELČÁK, Jan. *Cavitation in the Armature*. In Ostrava: Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-TUO, 2014. 60p.

Thesis is focused on measuring cavitation in the control armature which is developed by company ARMATURY Group a.s. There is research about cavitation in control valves based on large amount resources. Hydraulic circuit for measuring flowing in control armature was put together and rated pressure recovery factor FL was computed. After this were measured p-Q characteristics during small openings of armature for numerical simulation in FLUENT. During this step just inception cavitation was reached. At the end of thesis are simulation-measuring comparisons and computed cavitation index too.

OBSAH

POUŽITÉ ZACENÍ	8
1. ÚVOD.....	11
2. KAVITACE V REGULAČNÍCH ARMATURÁCH.....	13
2.1. Kavítace.....	13
2.2. Historie kavítace.....	13
2.3. Regulační armatury	13
2.4. Vznik kavítace v regulačních armaturách	13
2.5. Tlakové síly vyvolané zánikem parních bubliny	14
2.6. Hydrodynamická kavítace ve stacionárním a nestacionárním proudovém poli, kavítace vírová	15
2.6.1. Hydrodynamická kavítace ve stacionárním proudovém poli	15
1.1.2 Hydrodynamická kavítace v nestacionárním proudovém poli	16
1.1.3 Kavítace vírová	17
2.7. Parametry ovlivňující kavítaci	18
2.8. Kavitační fáze.....	20
2.9. Následky kavítace v regulačních armaturách.....	21
2.10. Světélkování jako zvláštní případ kavítace	22
2.11. Metody zvýšení odolnosti regulačních armatur proti kavitační erozi.....	22
2.12. Úprava regulačních kuželek proti vzniku kavítace	23
3. SOUČINITEL REGENERACE TLAKU F_L	25
3.1. Význam součinitele regenerace tlaku F_L	25
3.2. Standard návrhu regulačních armatur IEC534-2.....	25
3.3. Zkušební obvod	28
3.4. Měření	31
3.5. Vyhodnocení měření	31
4. MĚŘENÍ KAVITACE	33
4.1. Diagnostika kavítace v regulačních armaturách	33
4.2. Posouzení kavitační odolnosti armatury	33
4.2.1. Okamžitá kavitační odolnost regulačních armatury	33
4.2.2. Vlastní kavitační odolnost metodou SIGMA.....	34
4.3. Měření	35
4.4. Vyhodnocení	36
5. MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V REGULAČNÍ ARMATUŘE	37

5.1.	Metoda konečných objemů	37
5.2.	Matematická definice turbulentního modelu k- ϵ standard	37
5.3.	Matematické modely kavitace.....	39
5.3.1.	Singhalův kavitační model.....	39
5.3.2.	Kavitační model Zwart-Gerber-Belamri.....	40
5.3.3.	Kavitační model Shnerr-Sauer.....	41
5.4.	Příprava numerické simulace	41
5.4.1.	Příprava výpočetní sítě.....	41
5.4.2.	Okrajové podmínky a nastavení řešiče	42
5.5.	Vyhodnocení numerické simulace	44
6.	ZÁVĚR.....	50
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
	SEZNAM PŘÍLOH.....	54
	PŘÍLOHY	55

POUŽITÉ ZAČENÍ

b	opravný koeficient	1
c	rychlost proudění	m.s^{-1}
C	průtokový součinitel	1
C_e	empirická konstanta	1
$C_{1\varepsilon}$	konstanta	1
$C_{2\varepsilon}$	konstanta	1
$C_{3\varepsilon}$	konstanta	1
C_μ	konstanta	1
dc/dt	zrychlení proudění	m.s^{-2}
DN	jmenovitá světlost	mm
f	frekvence	s^{-1}
f_v	hmotnostní zlomek páry	1
F	síla	N
$F_{\text{kondenzač}}$	kondenzační koeficient	1
F_P	součinitel tvaru potrubí	1
F_v	odpařovací koeficient	1
F_F	součinitel kritického tlaku	1
F_L	součinitel regenerace tlaku	1
F_{LP}	součinitel regenerace tlaku pro armaturu s přídavným zařízením	1
G_b	je produkce turbulentní kinetické energie způsobená vztlakovou silou	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
G_k	je produkce turbulentní kinetické energie způsobená rychlostními gradienty	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
h	výška	m
k	turbulentní kinetická energie	J.kg^{-1}
K_V	průtokový součinitel	1
K	objemový modul pružnosti	Pa
l	délka	m
L_t	délkové měřítko turbulentní oblasti	1

Q_{ms}	hmotnostní průtok na plochu	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
N	číselná konstanta	1
n	otáčky elektromotoru	min^{-1}
p	tlak	bar
PN	jmenovitý tlak	bar
PSE	koeficient vlivu tlaku	1
Q	objemový průtok	$\text{m}^3.\text{hod}^{-1}$
R	univerzální plynová konstanta	$\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	1
R_e	efektivní součinitel výměny pro $p \leq p_{nasyc}$	1
R_c	efektivní součinitel výměny pro $p \geq p_{nasyc}$	1
S	plocha	m^2
S_K	uživatelé definovaný zdrojový člen	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
Sr	Strouhalovo číslo	1
S_ε	je uživatelem definovaný zdrojový člen	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
SSE	koeficient vlivu velikosti	1
t	teplota	$^\circ\text{C}$
T	teplota	K
u	rychlost proudění ve směru X	m.s^{-1}
v	rychlost proudění ve směru Y	m.s^{-1}
\bar{v}_v	vektor rychlosti parní fáze	-
V_{ch}	rychlost aproximovaná z lokální intenzity turbulence	m.s^{-1}
w	rychlost proudění ve směru Z	m.s^{-1}
V	objem	m^3
x	opravný koeficient	1
Y_M	příspěvek flukтуаční dilatace k celkové disipační rychlosti	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
z	zdvih armatury	mm
ΔH	molární výparná entalpie	K.J.mol^{-1}
Δp	tlakový spád	Pa
$\alpha_{nukleač}$	nukleační objemový zlomek páry	1
δ_{ij}	Kroneckerova delta	1

ε	rychlost disipace	$\text{m}^2.\text{s}^{-3}$
μ_t	turbulentní vírová viskozita	Pa.s
ξ	ztrátový součinitel	1
ξ_B	Bernoulliho součinitel	1
σ	kavitační index	1
σ_k	Prandtlovo číslo pro turbulentní kinetickou energii	1
σ_{kap}	povrchové napětí kapaliny	N.m^{-1}
σ_ε	Prandtlovo pro rychlost disipace	1
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ω	kruhová frekvence turbulentních vírů	s^{-1}

indexy:

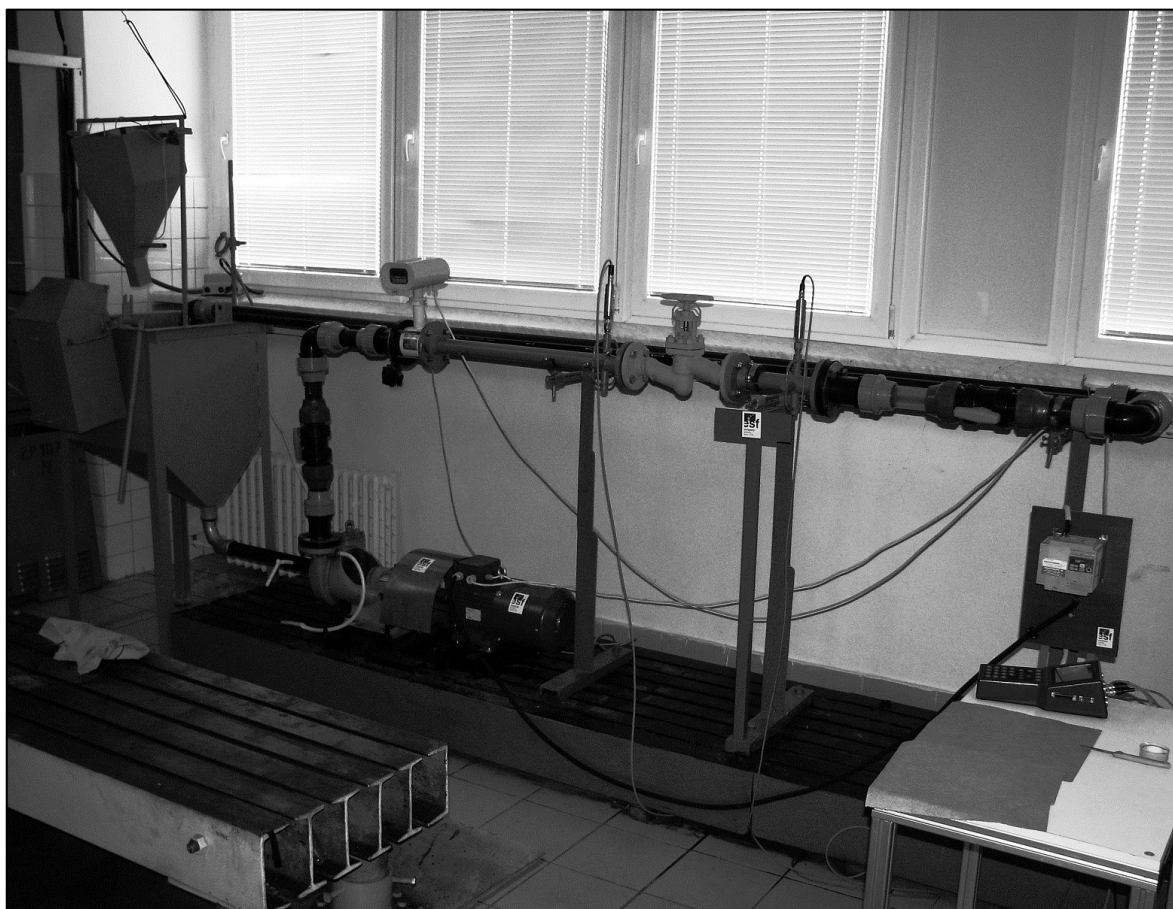
∞	mnohonásobek
0	počátek
1	vstup
2	výstup
a	atmosférický
B	bublina
c	kritické pásmo
k	kapalina
m	směs
min	minimum
max	maximum
kav	kavitační oblast
i, j, k, m	sčítací indexy
r	turbulence
v	pára
$vír$	vír

1. ÚVOD

Zkoumaným prvkem je regulační armatura DN40 a PN160 z produktové nabídky ARMATURY GROUP a.s. Výrobce má zájem o postavení hydraulického obvodu pro měření průtokových charakteristik $Q - \Delta p$ a stanovení součinitele regenerace tlaku F_L . Těmto problémům a současně metodám posouzení kavitační odolnosti armatur se budu věnovat v následujících kapitolách.

Obvod, na jehož návrhu a montáži jsem se podílel, byl sestaven v prostorech VŠB- Technické univerzity Ostrava na přelomu roku 2013 a 2014. Obvod byl použit při měření:

- součinitele regenerace tlaku F_L dle normy ČSN EN 60534-2-3 Regulační armatury pro průmyslové procesy- Část 2-3: Průtok- Zkušební postupy;
- průtokových charakteristik $Q - \Delta p$ při malých zdvizích armatury $z = 0,5; 1; 2; 5mm$.



Obrázek 1 Fotografie zkušebního obvodu pro měření regulačních armatur

Před dalším postupem jsem vypracoval vlastní rozsáhlou rešerši na témata kavitace v regulačních armaturách a informací nutných k pochopení kavitačního procesu.

Z rešerše vyplývá, že praxe při měření kavitace využívá následující metody:

- vibračně-akustická metoda (např. na základě IEC 60534-8-3) [21] [22];
- demontáž armatury a následná optická kontrola kavitačního opotřebení.

Těchto časově a technicky náročných metod nejsme schopni na Katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení docílit. Z toho důvodu volím jednoduchý přístup k posouzení přítomnosti kavitace v armatuře formou:

- určení kavitačního indexu σ pro regulační armatury;
- numerické modelování proudění v armatuře.

Měření a simulace jsem vyhodnotil graficky formou závislostí v závěru příslušných kapitol. V přílohách za textem diplomové práce jsem uvedl tabulkové přehledy výsledků a na datovém CD nosiči předkládám soubory potřebné pro numerické modelování proudění pro program FLUENT.

2. KAVITACE V REGULAČNÍCH ARMATURÁCH

2.1. Kavitate

Kavitate je jev, při kterém v kapalině náhle vznikají a zanikají parní bublinky. Pozornost technické praxe si získala převážně díky svým negativním účinkům.

2.2. Historie kavitace

Současně známá podoba kavitačního jevu byla objevena v roce 1893 dvojicí vědců Barnaby-Parsons. Ta přisoudila příčinu mechanického opotřebení lodního šroubu jedné z lodí britského námořnictva shluku parních bublin, který byl pozorován na lopatkách šroubu. [1]

2.3. Regulační armatury

Regulační armatury jsou zařízení, která slouží k regulaci průtoku tekutiny. Pro plnění této funkce jsou na jejich vlastnosti kladeny požadavky. Z těch si můžeme vyjmenovat následující:

- jmenovitá světlost DN a jmenovitý tlak PN;
- tvár průtočné charakteristiky (lineární, rovno-procentní, parabolická, atd.);
- průtokový součinitel K;
- ztrátový součinitel ξ ;
- odolnost proti světélkování a kavitaci (kavitační index σ).

Tyto vlastnosti jsou závislé na vlastní konstrukci armatury, jejího škrtícího systému a ovládacího pohonu. Řadu informací o návrhu a určení vlastností armatur je možné nalézt v literatuře. [2]

2.4. Vznik kavitace v regulačních armaturách

U regulačních armatur mluvíme o hydrodynamické kavitaci vyvolané vlastní činností armatury.

Parní bubliny v kapalině vznikají z kavitačních jader, kterými rozumíme nerozpuštěný vzduch. Za kavitační jádra považujeme také volné bubliny vzduchu, který se v hydraulickém obvodu vyskytne nedopatřením přísáváním na zdroji. Jeho původ je možné hledat také v mikroskopických štěrbinách, které se nachází v obtékaných stěnách.

Ve chvíli kdy v armatuře dochází k regulování průtoku, nachází se místo nejmenšího průřezu mezi regulační kuželkou a tělesem ventilu. V tomto místě dochází k urychlení kapaliny a snížení tlaku. Poklesne-li tlak pod hodnotu tlaku sytých par, začínají kavitační jádra růst. Dochází k náhlé produkci parních bublin, které jsou dále unášeny proudem.



Obrázek 2 Snímek zachycující zánik parní bubliny v glycerinu [3]

Za místem nejmenšího průřezu dochází ke zpětnému nárůstu tlaku, pod jehož tíhou se parní bubliny náhle smršťují a zanikají. Plyny v bublině obsažené částečně difundují do okolní kapaliny a na jejich místo vniká kapalina. Zbytky plynů na místě zanikající bubliny, vlivem stlačitelnosti několikrát zmenší a zvětší svůj objem. Dojde k pulzacím tlaku a špičkám dosahujícím hodnot větších 100MPa.

Jádro potřebuje určitý čas k tomu, aby dosáhla kritické velikosti. Jádra stejné velikosti tak mohou projít oblastí, která splňuje kavitační podmínky, aniž by začala explodovat.

2.5. Tlakové síly vyvolané zánikem parních bubliny

Tlakové síly vyvolané kavitací se liší na základě průběhu zániku parních bublin a rychlosti kapaliny.

Rozlišujeme následující:

- symetrický kolaps bubliny;
- asymetrický kolaps bubliny;
- hromadný kolaps;
- kavitační víry.

Symetrický kolaps bubliny je znázorněn na *Obrázek 2 Snímek zachycující zánik parní bubliny v glycerinu [3]*. Vyvolává tlakovou vlnu o velikosti až 100MPa.

Při asymetrickém kolapsu parní bubliny vzniká paprsek kapaliny, který vyvolává tlaky až 150MPa. Povrch parní bubliny je „promáčknut“ okolní kapalinou do jejího jádra. Takto mohou vzniknout vodní paprsky dosahující rychlostí až 100m.s⁻¹.

Hromadný kolaps nastává při místním zániku většího množství parních bublin. Kolaps se vyznačuje kaskádovým průběhem, kdy se zánikem prvních bublin podněcuje k zániku bubliny okolní.

Kavitační víry můžeme pozorovat při smykových tocích za rotujícími tělesy, jakými jsou třeba trysky, ad. V závislosti na rychlosti kapaliny dochází k tlakovým vlnám anebo vznikají paprsky kapaliny.

2.6. Hydrodynamická kavitace ve stacionárním a nestacionárním proudovém poli, kavitace vírová

2.6.1. Hydrodynamická kavitace ve stacionárním proudovém poli

V případě stacionárního proudění je velikost tlaku přímo závislá na rozložení rychlosti. Z rovnice spojitosti toku vyplývá, že největší rychlost kapaliny c_2 [m.s⁻¹] se nachází v místě nejmenšího průřezu, viz rovnice (1).

$$c_2 = S_1 \cdot \frac{c_1}{S_2} \quad (1)$$

Kde:

c_1 je rychlost proudu vstupujícího do kanálu [m.s⁻¹],

c_2 je rychlost v nejužším místě kanálu [m.s^{-1}],

S_1 je plocha průřezu vstupu do kanálu [m^2],

S_2 je plocha průřezu výstupu z kanálu [m^2].

Velikost maximálního místního tlaku p_2 se odvodí z Bernoulliho rovnice, viz rovnice (2).

$$p_2 = p_1 - \rho \cdot \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \quad (2)$$

Kde:

c_1 je rychlost proudu vstupujícího do kanálu [m.s^{-1}],

c_2 je rychlost v nejužším místě kanálu [m.s^{-1}],

ρ je hustota kapaliny [kg.m^{-3}],

p_1 je tlak ve vstupu do kanálu [Pa],

p_2 je tlak v nejužším místě kanálu [Pa].

Kavitace zde nastane při snížení místního tlaku p_2 pod hodnotu tlaku sytých par p_v , viz rovnice (4).

$$p_2 \leq p_v \quad (3)$$

Kde:

p_v je tlak sytých par při dané teplotě [Pa], který je možné odečíst pro vodu dle tabulky v příloze A) Hodnoty tlaku sytých par v teplotním rozmezí 0-350 °C.

1.1.2 Hydrodynamická kavitace v nestacionárním proudovém poli

Při nestacionárním proudění je místní tlak p_2 proměnný v závislosti na lokálním zrychlení proudu, viz rovnice (4).

$$p'_2 = p_2 - \rho \cdot x \cdot \frac{dc}{dt} \quad (4)$$

Kde:

x je délka zrychleného sloupce kapaliny [m],

p_2 je tlak proudu [Pa],

$\frac{dc}{dt}$ je zrychlení proudu [m.s^{-2}].

Kavitace při nestacionárním proudění je dána závislostí, viz rovnice (5).

$$p'_2 \leq p_v \quad (5)$$

1.1.3 Kavitace vírová

Kavitace vírová se nachází ve vírech vznikajících a pohybujících se v kapalině.

Kavitační víry vznikají v následujících dvou případech:

- při obtékání výstupků a nerovností;
- při oboustranném obtékání tělesa.

Pro oba případy je výše tlaku v jádře víru p_{vir} dána vztahem, viz rovnice (6).

$$p_{vir} = p_k - \rho \cdot \frac{c_{vir}^2}{2} \quad (6)$$

Kde:

c_{vir} je rychlost v jádře víru [m.s^{-1}],

p_k je tlak v okolní kapalině [Pa].

Pro vznik vírové kavitace platí podobně jako v předchozích případech závislost, viz rovnice (7).

$$p_{vir} \leq p_v \quad (7)$$

U vírů vznikající obtékáním výstupků a nerovností platí pro frekvenci jejich vzniku Strouhalovo číslo Sr , viz rovnice (8).

$$Sr = \frac{f \cdot h}{c_v} = 0,2 \quad (8)$$

Kde:

f je frekvence vzniku vírů [s^{-1}],

h je výška výstupku [m],

c_v je rychlost volného proudu [$m \cdot s^{-1}$].

Při oboustranném obtékání tělesa můžeme pozorovat Kármánovy vírové cesty. Pro frekvenci vzniku vírů při proudění zúžením platí Strouhalovo číslo, jehož hodnotu je nutné určit na základě délky kavitační oblasti, viz rovnice (9).

$$Sr' = \frac{f \cdot l_{kav}}{c_v} \quad (9)$$

Kde:

l_{kav} je délka kavitační oblasti [m].

2.7. Parametry ovlivňující kavitaci

Mezi faktory ovlivňující kavitaci patří následující vlastnosti kapaliny:

- stlačitelnost kapaliny;
- volný (nerozpuštěný) vzduch v kapalině;
- povrchové napětí;
- tlak sytých par.

Pro určení stlačitelnosti kapaliny se zavádí objemový modul pružnosti K_s , viz rovnice (10), který má hodnotu $2 \cdot 10^9 Pa$ pro vodu. [6]

$$K_s = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V} \quad (10)$$

Kde:

V_0 je původní objem kapaliny [m^3],

ΔV je změna objemu vlivem stlačení [m^3],

Δp je změna tlaku vyvolaná stlačením [Pa].

Volný (nerozpuštěný) vzduch v kapalině se projevuje zvýšením stlačitelnosti kapaliny již při nízkých tlacích. Pro stanovení statického modelu pružnosti K^* , viz rovnice (11), zohledňujícího nerozpuštěný vzduch je třeba pohlížet na stlačované médium jako suspenzi vody a vzduchu. [6]

$$K^* = K \cdot \frac{1 + \frac{V_p}{V_k}}{1 + \frac{p_a}{p} \cdot \frac{V_p}{V_k} \cdot \frac{K}{p}} \quad (11)$$

Kde:

V_k je objem kapaliny ve směsi při tlaku p_a [m^3],

V_p je objem plynu ve směsi při tlaku p_a [m^3],

p je pracovní tlak kapaliny [Pa],

p_a je atmosférický tlak [Pa].

Povrchové napětí kapaliny σ_{kap} , viz rovnice (12), ovlivňuje počátek a zánik kavitace. Současně s hodnotou povrchové napětí kapaliny je navyšována potřeba času pro růst kavitačních bublin. [7] [8]

$$\sigma_{kap} = \frac{dF}{dl} \quad (12)$$

Kde:

dF je velikost povrchové síly [N],

dl délka okraje povrchové blány [m].

Tlak sytých par je nejvyšší tlak, při kterém může existovat látka v rovnovážném plynném stavu za dané teploty. Současně se jedná o nejnižší tlak, při kterém látka existuje v kapalném či pevném stavu.

Pro určení tlaku sytých par při změně teploty uvádí literatura [9] a [10] přístup, kde je využito experimentu pozorování vyrovnání entalpie. Následně je stanovena hodnota $\ln(p_w)$ integrací Clausio-Clapeyronovy rovnice, viz rovnice (13).

Hodnoty tlaku sytých par pro vodu jsou uvedeny v příloze A) *Hodnoty tlaku sytých par v teplotním rozmezí 0-350 °C*.

$$\frac{d \ln p_v}{dT} = \frac{\Delta H}{R \cdot T^2} \quad (13)$$

Kde:

T je teplota [K],

ΔH je molární výparná entalpie [K.J.mol⁻¹],

R je univerzální plynová konstanta [J.K⁻¹.mol⁻¹].

2.8. Kavitační fáze

Při posuzování kavitace se vychází z pozorování kavitačního mraku. Tím rozumíme shluk parních bublin, který se objevuje na místě vzniku kavitace. [7]

Je-li kavitace posuzována na základě jejího vlivu na průtočné parametry, pak se rozlišují dále uvedené tři fáze.

1. Počáteční kavitace
2. Vyvinutá kavitace
3. Plně vyvinutá kavitace

V první fázi je dosaženo kritické velikosti kavitačních jader a v kapalině můžeme zaznamenat první parní bubliny. Druhá fáze je přechodovým stavem, ve kterém pozorujeme kavitační mrak. Při třetí fázi je možné kavitaci pozorovat již na základě znatelného poklesu průtočných parametrů.

Zde je na místě upozornit na možnost výskytu zdánlivé kavitace. Nastane stav, při kterém je v kapalině obsaženo množství velkých bublin vzduchu, což má za následek významné urychlení kavitačního procesu.

2.9. Následky kavitace v regulačních armaturách

Kavitace je doprovázena řadou následujících negativních projevů:

- chvění (vibrace a emise hluku v oblasti ultrazvuku);
- snížení průtočných parametrů;
- kavitační eroze.

Kavitace v regulačních armaturách se vyznačuje vibracemi. Společně s těmi jsou její projevy měřitelné v oblastech ultrazvuku. V mnohých případech je možné zaznamenat také zvuk podobný přerušovanému praskání v oblasti slyšitelných frekvencí. Tlakové fluktuace jsou přenášeny z tělesa armatury do výstupního potrubí, které mohou rozkmitat. [11]

Při plně vyvinuté kavitaci výskyt kavitačního mraku v proudovém poli znatelně ovlivňuje průtočné parametry armatury. [7]



Obrázek 3 Snímek zachycující typické kavitační opotřebení [12]

Největší pozornost je však věnována kavitační erozi. K opotřebení dochází při zániku parních bublin vlivem tlakových špiček, při čemž dochází k oddělování materiálů z blízké obtékané stěny. Materiál je dále unášen kapalinou, přičemž místo zániku parních bublin poznáme podle výskytu důlkovitých útvarů, viz *Obrázek 3 Snímek zachycující typické kavitační opotřebení* [12]. V případě, kdy kavitační proces není zastaven, tyto útvary zvětšují svou velikost až na několik centimetrů.

Kavitační erozi bývá rozsáhle zasažena samotná kuželka, a tak řada výrobců vyvíjí snahu tomuto problému předcházet úpravou jejich konstrukce. [11]

2.10. Světélkování jako zvláštní případ kavitace

Světélkování (luminiscence) je zvláštní případ kavitace. Dochází k němu v případě, kdy dojde k zpětnému obnovení tlaku, který umožňuje zánik kavitačních bublin. Tento tlak však na rozdíl od kavitace nepřekročí zpět hodnotu tlaku sytých par. Zbylý plyn, nacházející se na místě zanikající bubliny, se velmi intenzivně stlačí a ohřeje, čímž dojde k elektrickým výbojům.

Pozor! Světélkování dává za vznik erozi, která vypadá trochu jinak vzhledem k té kavitační a předchází se ji jinými metodami. [11]

2.11. Metody zvýšení odolnosti regulačních armatur proti kavitační erozi

Kavitační erozi bývá zasažena regulační kuželka, sedlo a vnitřek tělesa armatury. Předcházení a zvýšení odolnosti regulačních armatur proti kavitační erozi se provádí některou z následujících metod:

- vhodná volba typu a velikosti regulační armatury;
- odstranění průsaku kapaliny;
- katodická ochrana sedla a regulační kuželky.

Životnost regulační armatury můžeme prodloužit volbou vhodného typu. Vybíráme správnou velikost odpovídající naší aplikaci. Čím větší armaturu používáme, tím větší můžeme očekávat rozsah poškození případnou kavitací. Některé armatury jsou opatřeny anti-kavitační kužalkou. Odolnost armatur je zvyšována vytvrzením materiálu kuželky, sedla a vnitřku tělesa. Používá se kupříkladu stelit a další houževnaté materiály. Časem však kavitační erozi podlehnou každý povrch. [13]

Jako nežádoucí se jeví průsak kapaliny, ke kterému může dojít v případě netěsnosti mezi regulační kužalkou a sedlem. V případě průsaku dochází k nadměrnému tlakovému spádu, který taktéž vyvolává kavitační erozi.

Okrajově zde můžeme zmínit katodickou ochranu, která byla taktéž prokázána jako účinná. Její použití je argumentováno přisouzením příčiny kavitační eroze elektrochemickým procesům. Kapalina v místě nárazu ohřeje část materiálu, který s okolním relativně chladným materiálem vytváří termoelektrický článek. Ten vyvolává elektrochemickou korozi povrchové vrstvy. [14]

2.12. Úprava regulačních kuželek proti vzniku kavitace

Vzniku kavitace se předchází úpravou konstrukce regulační kuželky. Účel všech těchto anti-kavitačních kuželek je stejný, a to rozptýlit vznikající parní bubliny. Současně provedení kuželek umožňuje kontrolované snižování tlaku tak, aby nebylo dosaženo hodnoty tlaku sytých pár.



Obrázek 4 Snímek zachycující anti-kavitační kuželku [11]

Na základě literatury [2] [11] [15] můžeme popsat následující konstrukce:

- klecová děrovaná kuželka;
- kuželka s vedením proudu skrz;
- systém rozdělení proudu;
- systém děrovaná klec v děrované kleci;
- systém kuželka a plná klec tvořící sérii překážek průtoku.

Klecovou děrovanou kuželku tvoří dutý válec, ve kterém jsou otvory. Válec je opatřen pevným dnem a je otočen o 180°. Médium se přivádí ve směru uzavírání nad kuželku. Možné je i opačné provedení.

Kuželka s vedením proudu skrz je opatřena otvory, které umožňují postupnou regeneraci tlaku vedené kapaliny.

Systém rozdělení proudu je tvořen vnější klecí podobné předchozímu provedení. Uvnitř klece se nachází série vložek, taktéž ve tvaru dutého válce s otvory, které jsou navíc opatřeny drážkami. Médium je vedeno skrz klec a drážky vložky k otvorům a dále. Postupně médium prochází celým systémem.

Moderním řešením je systém děrovaná klec v děrované kleci. Systém tvoří vnější klec ve tvaru dutého válce s otvory, která je přichycena k sedlu regulační armatury. Uvnitř této klece se nachází další, tentokrát pohyblivá, klec obdobné konstrukce. Proudění je regulováno překrýváním hran klecí s otvory. Vhodné řešení pro průtoky nadměrných velikostí, u kterých nasazením kuželky nejen předcházíme vzniku kavitace. Jeho schopností je soustředit případné kvitující bubliny do prostoru mezi klecemi, které jsou zhotoveny z houževnatého materiálu s vyšší kavitační odolností.

Poslední systém kuželka a plná klec tvořící sérii překážek průtoku je prostorově náročnějším řešením. Je typický pevnou plnou klecí přichycenou k sedlu armatury, která společně s pohyblivou kuželkou tvoří sérii přepážek rozptylující proudění.

3. SOUČINITEL REGENERACE TLAKU F_L

3.1. Význam součinitele regenerace tlaku F_L

Součinitel regenerace tlaku F_L je experimentálně stanovený koeficient, který se využívá při návrhu regulačních armatur dle mezinárodně uznávané normy IEC 534-2. [22]

Koeficient F_L zohledňuje schopnost proudění obnovit tlakovou energii na původní hodnotu po průchodu regulační armaturou. Při návrhu regulačních armatur dle standardu se z této hodnoty určí maximální možný tlakový spád armatury v bezpečné vzdálenosti od plně vyvinuté kavitace.

3.2. Standard návrhu regulačních armatur IEC534-2

Dle standardu IEC 534-2 je možné rozdělit postup návrhu regulační armatury pro dopravu kapalných médií do následujících šesti kroků. [22]

1) Odhad základních provozních parametrů:

- provedení armatury;
- pracovní médium (voda, olej, ad.);
- odhadované hodnoty Q , p_1 , p_2 , Δp , T_1 , p_v , v , p_c .

2) Určení číselných konstant N .

Určí se číselné konstanty podle přílohy C) *Tabulka číselných konstant*.

3) Určení součinitele tvaru potrubí F_p .

Tento krok platí pouze pro armatury s přídatnými zařízeními, kterými se rozumí redukce, kolena, apod. připojené přímo ke vstupu či výstupu regulační armatury.

4) Určí se maximální hodnoty Q_{max} , Δp_{max} mimo oblast kavitace.

5) Dopočte se příslušná hodnota průtokového součinitele C_v .

6) Na základě odhadnutých provozních parametrů a průtokového součinitele C_v , se vybere vhodná regulační armatura.

Standard návrhu regulačních armatur IEC534-2 je dán rovnicemi (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21) a (22).

$$F_p = \left[1 + \frac{\sum \xi}{N_2} \cdot \left(\frac{C_v}{d^2} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (14)$$

Kde:

N_2 je číselná konstanta podle C) Tabulka číselných konstant [1],

d je fiktivní nominální světlost armatury [mm].

$$\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_{B1} - \xi_{B2} \quad (15)$$

Kde:

ξ_1 je ztrátový součinitel proti směru proudění přídavným zařízením [1],

ξ_2 je ztrátový součinitel ve směru proudění přídavným zařízením [1],

ξ_{B1} je Bernoulliho součinitel vstupního přídavného zařízení [1],

ξ_{B2} je Bernoulliho součinitel výstupního přídavného zařízení [1].

$$\xi_B = 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \quad (16)$$

Kde:

D je světlost přídavného zařízení [mm].

Nejběžněji používaným přídavným zařízením je krátká redukce, jejíž ztrátový součinitel se určí dle rovnice (17).

$$\xi_1 + \xi_2 = 1,5 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \quad (17)$$

$$Q_{max} = N_1 \cdot F_L \cdot C_V \cdot \sqrt{\frac{p_1 - F_F \cdot p_v}{\rho/\rho_0}} \quad (18)$$

Kde:

N_1 je číselná konstanta podle přílohy C) *Tabulka číselných konstant* [1],

F_F je součinitel kritického tlaku.

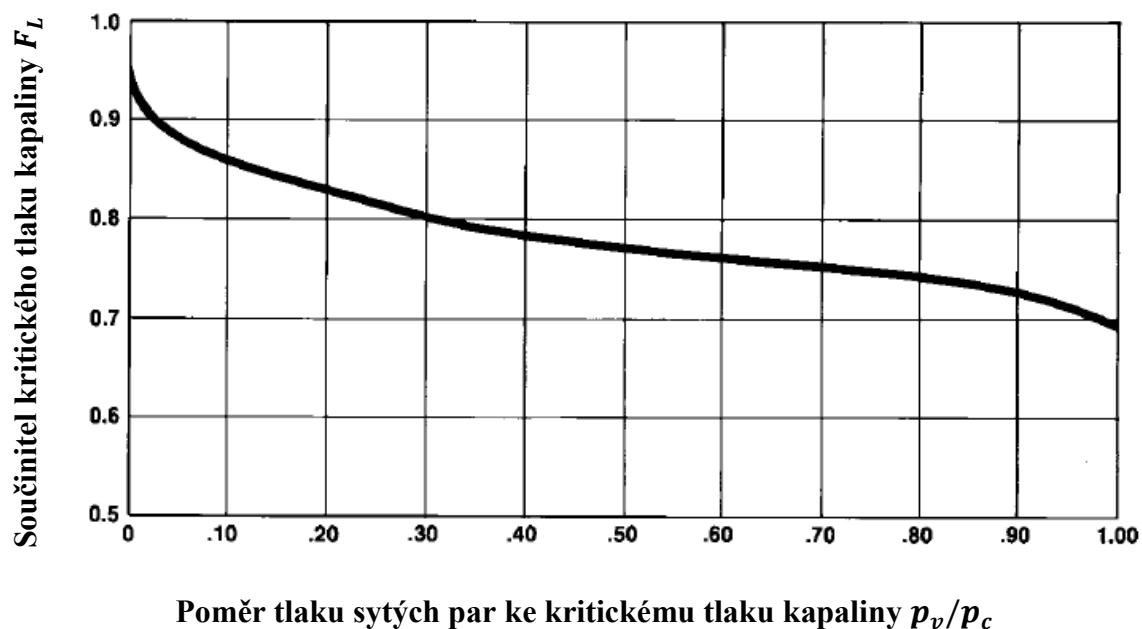
Pro určení kritického součinitele tlaku vody F_F lze použít rovnici (19).

$$F_F = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} \quad (19)$$

Kde:

p_c je kritický tlak kapaliny, který pro vodu nabývá hodnoty $p_c = 22,06 \cdot 10^6 \text{Pa}$. [18]

Součinitel F_F všech ostatních kapalin vyjma vody se určuje odečítáním z diagramu na *Obrázek 5 Křivka pro odečet součinitele kritického tlaku kapalin vyjma vody*.



Obrázek 5 Křivka pro odečet součinitele kritického tlaku kapalin vyjma vody [19]

Přesná hodnota součinitele regenerace tlaku F_L se určuje na základě experimentálních měření. Pro armaturu s přidavnými zařízeními se na jeho základu dopočte F_{LP} , viz rovnice (20).

$$F_{LP} = \left[\frac{\xi_1 + \xi_{B1}}{N_2} \cdot \left(\frac{C_V}{d^2} \right) + \frac{1}{F_L^2} \right]^{-1/2} \quad (20)$$

Kde:

N_2 je číselná konstanta podle přílohy C) *Tabulka číselných konstant* [1].

Pro armaturu bez přidavných zařízení platí rovnice (21).

$$\Delta p_{\max(L)} = F_L^2 \cdot (F_F \cdot p_v) \quad (21)$$

Pro armaturu s přidavnými zařízeními platí rovnice (22).

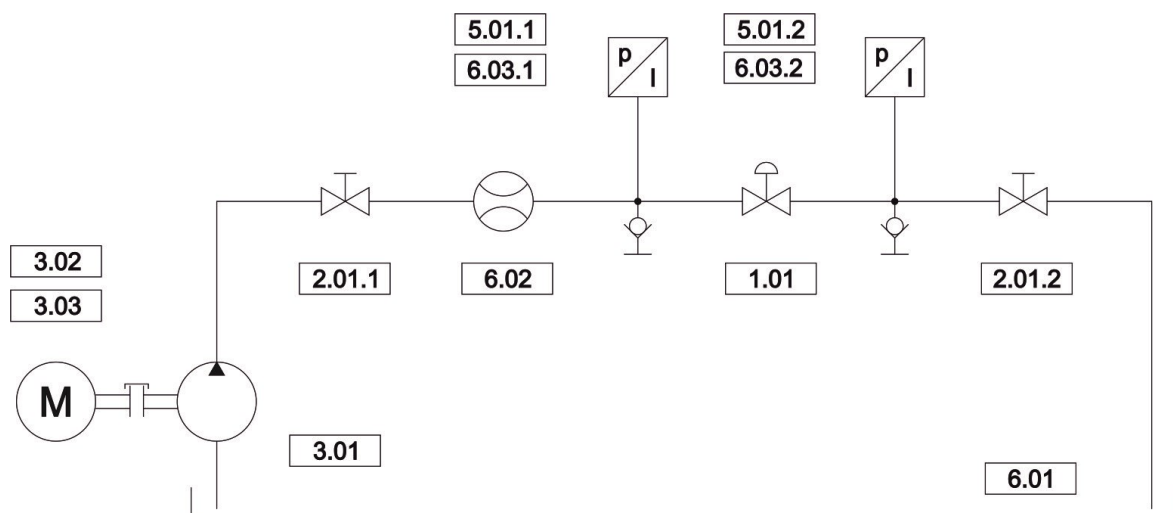
$$\Delta p_{\max(LP)} = \left(\frac{F_{LP}}{F_P} \right)^2 \cdot (F_F \cdot p_v) \quad (22)$$

3.3. Zkušební obvod

Zkušební obvod byl postaven v prostorech laboratoří VŠB- Technické univerzity Ostrava. Na jeho návrhu jsem spolupracoval a vycházel jsem z omezení daných normou ČSN EN 60534-2-3 *Regulační armatury pro průmyslové procesy- Část 2-3: Průtok- Zkušební postupy* [20].

Pro sestavení zkušebního obvodu dle *Obrázek 6 Hydraulické schéma zkušebního obvodu* byla třeba provést následující kroky.

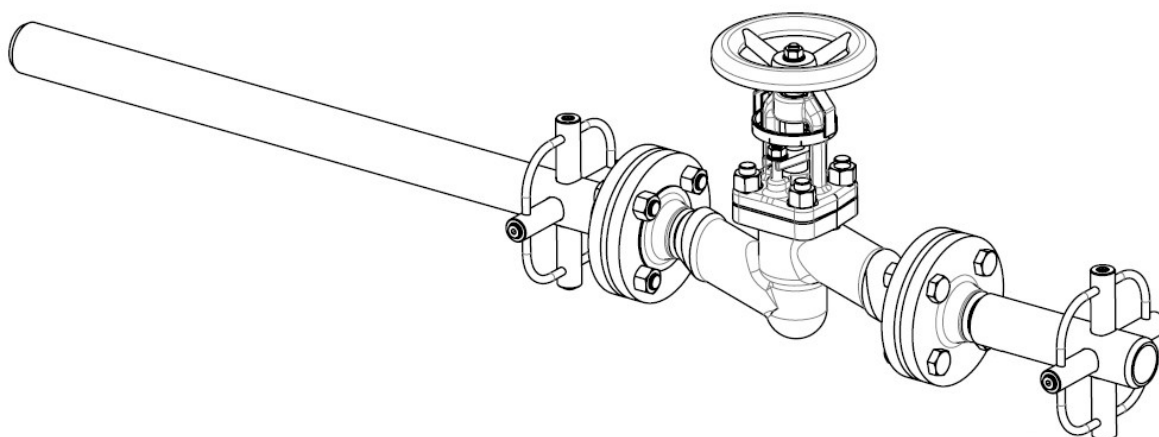
- Navrhnout čerpadlo.
- Navrhnout zkušební úsek.
- Navrhnout měřicí komponenty a ostatní komponenty potřebné pro sestavení obvodu.
- Vypracovat specifikaci prvků.



Obrázek 6 Hydraulické schéma zkušebního obvodu

Čerpadlo bylo vybráno po konzultaci vedoucího diplomové s výrobcem zkoušené armatury ARMATURY GROUP a.s. Zvolen byl starší typ odstředivého čerpadla NZ-3-165-S, který se již nachází v prostorech VŠB-Technické univerzity Ostrava.

Zkušební úsek jsem navrhnul na základě normy. Náskres zkušebního úseku je na *Obrázek 7 Náskres zkušebního úseku*. Je tvořen vstupním a výstupním potrubím, která jsou k armatuře ustavena přírubovými spoji. Potrubí slouží ke stabilizaci průtoku před a za armaturou, a současně se v něm nachází tlakové odběry. Tlakové odběry jsou umístěny po obvodu potrubí kolmo na osu armatury po 90°.



Obrázek 7 Náskres zkušebního úseku

Navržené měřicí komponenty a komponenty potřebné pro sestavení obvodu jsou sepsány ve specifikaci prvků, viz *Tabulka 1 Specifikace prvků*. Měřicí rozsah průtokoměru FN2014PTFEDN50 je $0,72\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ až $72\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Měřicí rozsah snímačů tlaku 3403-32-S-71.33A je -1bar až 60bar .

Zkušební obvod umožňuje připojit regulační armaturu ke zdroji tlaku 3.01 v uzavřeném okruhu s nádrží 6.01. Armatura se nachází zhruba 420mm nad hladinou. Dále obvod umožňuje ovládání tlakového spádu před a za armaturou pomocí uzavíracích ventilů 2.01.1 a 2.01.2. Umístění snímačů tlaků 5.01.1 a 5.01.2 s průtokoměrem 6.02 umožňuje odečítání a zaznamenávání parametrů proudění dle požadavků normy.

Snímek zkušebního obvodu je k vidění na *Obrázek 1 Fotografie zkušebního obvodu pro měření regulačních armatur*.

Tabulka 1 Specifikace prvků

SPECIFIKACE PRVKŮ				
č.	Ks	Název	Typ, výkres, číslo	Výrobce
I. ZKOUŠENÝ ÚSEK				
1.01	1	Zkušební úsek	8800-591	ARMATURY GROUP
II. ŘÍDÍCÍ PRVKY				
2.01	2	Uzavírací ventil	PPS 40 PE-PE	PCV ALFA
III. ZDROJ TLAKU				
3.01	1	Odstředivé čerpadlo	NZ-3-165-S	SIGMA HRANICE
3.02	1	Elektromotor	SG 112M-2-M	INDUKTA
3.03	1	Frekvenční měnič	VS mini J7	OMRON
IV. KOMPONENTY NA HL. VEDENÍ				
4.01	2	6m potrubí $\varnothing 63 \times 5,8$	SDR 11 PE100	GASTCONTROL
4.02	4	Koleno	PPS č. 5 40	PCV ALFA
4.03	3	Příruba	PPS č.15 50x6,4“	PCV ALFA
V. SNÍMAČE				
5.01	2	Snímače tlaku	3403-32-S-71.33A	HYDROTECHNIK
VI. OSTATNÍ				
6.01	1	Nádrž	-	Český svářečský ústav
6.02	1	Průtokoměr	FN2014PTFEDN50	ELIS PLZEŇ
6.03	2	Měřicí přípojky	1620 2103-01-33.00	HYDROTECHNIK

3.4. Měření

Pro měření bylo použito zkušebních postupů daných normou ČSN EN 60534-2-3 *Regulační armatury pro průmyslové procesy- Část 2-3: Průtok- Zkušební postupy* [20]. Zkoušky proběhly na regulační armatuře bez přídavných zařízení a zkoušenou kapalinou byla voda. Pozornost je věnována minimálnímu nastavitelnému zdvihu $z = 0,5\text{mm}$ při kterém je možné očekávat vznik kavitace.

Respektován byl následující postup.

1) Nastavil se požadovaný zdvih regulační armatury.

Tento zdvih je ponechán po celou dobu měření. S nastavením regulační armatury se v průběhu zkoušek nijak dále nemanipuluje.

2) Byla hledána hodnota maximálního průtoku Q_{\max} .

S předvoleným vstupním tlakovým spádem Δp_1 se změří průtok Q_1 , přičemž ventil 2.01.2 musí být plně otevřen. Tlakový spád se sníží na 90% a odečte se nové hodnoty Q_2 a Δp_2 . Tento postup opakujeme do okamžiku, kdy se hodnota průtoku liší oproti předcházející nejvýše o 2%. Potom je možné prohlásit $Q_1 = Q_{\max}$.

3) Dopočetl se součinitel regenerace tlaku F_L .

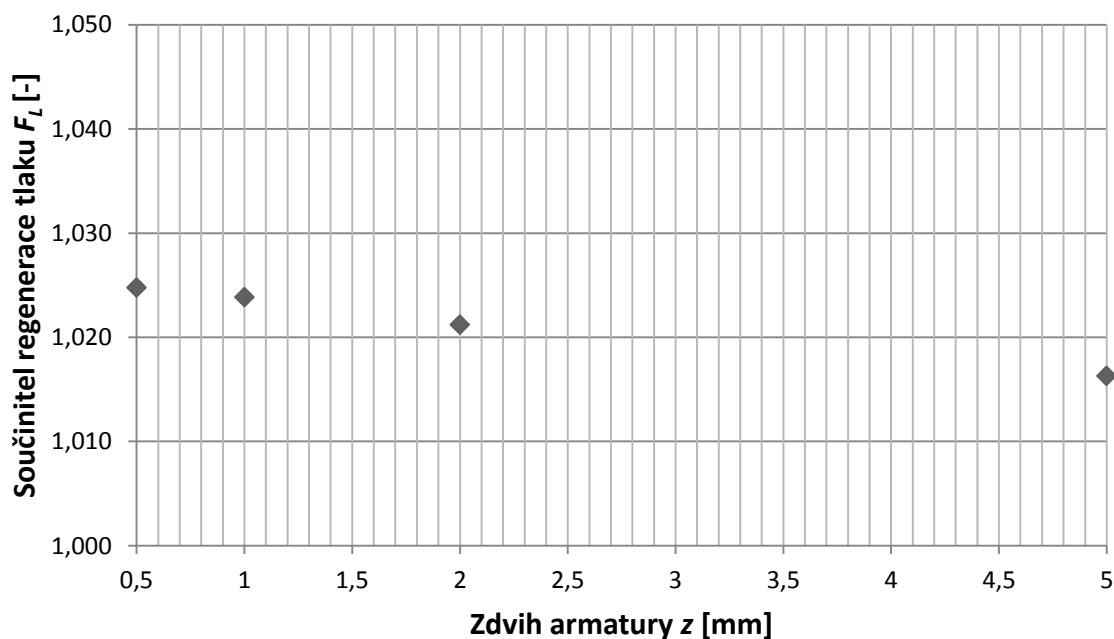
3.5. Vyhodnocení měření

Při vyhodnocování výsledků měření součinitele regenerace tlaku F_L bylo využito výjimky dané normou. Výjimka umožňuje při výpočtu vycházet z naměřeného Q_{\max} při maximálním povoleném, anebo dosažitelném tlaku ve zkušebním obvodu. Toho bylo dosaženo krátkodobým přetížením čerpadla NZ-3-165-S na $n = 1500\text{min}^{-1}$ a dále $n = 1650\text{min}^{-1}$.

Hodnoty Q_1 pro výpočet jsou brány jako aritmetické průměry z řady naměřených průtoků zaznamenaných ve spodní části tabulky.

Výpočet vychází z tabulky v příloze E) *Tabulka měření součinitele regenerace tlaku*.

Příklad výpočtu bude uveden pro nejpřesněji vypovídající variantu měření, při které bylo dosaženo rozdílu průtoků přibližně 3,2% při zdvihu $z = 0,5\text{mm}$ a otáčkách elektromotoru $n = 1650\text{min}^{-1}$.



Obrázek 8 Charakteristika $F_L(z)$ naměřená při $n=1650\text{min}^{-1}$

Matematická znění součinitele regenerace tlaku F_L lze odvodit z rovnice (18).

$$F_L = \frac{Q_{max}}{N_1 \cdot C_V} \cdot \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{p_1 - F_F \cdot p_v}} = \frac{1,785}{0,865 \cdot 1,64} \cdot \sqrt{\frac{1}{1,152 - 0,96 \cdot 0,0206}} = 1,025 \quad (23)$$

Kde:

p_v je hodnota tlaku sytých par, která pro vody při 18°C odpovídá $p_v = 0,0206\text{bar}$;

ρ/ρ_0 je měrná hustota, která pro vodu teplou 18°C dle normy [20] odpovídá $\rho/\rho_0 = 1$;

C_V je průtokový součinitel určený dle normy pro každé konkrétní měření.

$$C_V = \frac{Q_{max}}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta p}} = \frac{1,785}{0,865} \cdot \sqrt{\frac{1}{1,152 - (-0,037)}} = 1,89 \quad (24)$$

Kde:

N_1 je číselná konstanta podle C) Tabulka číselných konstant [1].

4. MĚŘENÍ KAVITACE

4.1. Diagnostika kavitace v regulačních armaturách

Mezi nejčastější používané metody posouzení kavitace v regulačních armaturách patří následující: [16]

- vibračně-akustická metoda (např. na základě IEC 60534-8-3) [21] [22];
- demontáž armatury a následná optická kontrola.

V běžném provozu je měření konkrétních vibrací vyvolaných zánikem parních bublin téměř nemožné a vyžaduje rozsáhlou izolaci okolních vibrujících součástí a rotujících zařízení. Akusticky se kavitace výrazně projevuje až ve svých pozdějších fázích, kdy armatura a potrubní systém již můžou být rozsáhle narušeny kavitační erozí. Právě z tohoto důvodu nachází tato metoda uplatnění pouze v dostatečně vybaveném laboratorním prostředí.

Demontáž a vizuální kontrola armatury vystavených kavitaci se využívá pro posouzení kavitační odolnosti materiálu, ze kterého je armatura zhotovena. Pozornost je věnována rozsahu a stanovení místa zasaženého erozí. Pro dodatečné stanovení kavitační odolnosti materiálu, ze kterého je armatura vyrobena, se určuje hmotnostního úbytku materiálu. [14]

4.2. Posouzení kavitační odolnosti armatury

4.2.1. Okamžitá kavitační odolnost regulačních armatury

Určuje se tzv. kavitační index σ , viz rovnice (25). Tato hodnota vychází z poměru mezi vlastnostmi armatury danými jejich konstrukčním řešením. Porovnána je schopnost armatury předcházet kavitaci, a také její náchylnost k vyvolání kavitace.

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} = \frac{\text{schopnost armatury předcházet kavitaci}}{\text{schopnost armatury vyvolávat kavitaci}} \quad (25)$$

Kde:

p_1 je absolutní tlak naměřený ve vzdálenosti dvojnásobku DN před vstupem armatury [Pa],

p_2 je absolutní tlak naměřený ve vzdálenosti šestinásobku DN za výstupem armatury [Pa].

Kavitační index poté můžeme zařadit do jednoho z níže uvedených rozsahů. Současně je možné tento index využít pro vhodnou volbu úpravy regulační kuželky. [16]

- $\sigma \geq 2$ bez kavitace;
- $1,7 < \sigma < 2,0$ kuželky z houževnatého materiálu;
- $1,5 < \sigma < 1,7$ klecové děrované kuželky a kuželky s vedením proudu;
- $1,0 < \sigma < 1,5$ systémy rozdělení proudu, systémy děrovaná klec v děrované kleci a systémy kuželka s plnou kleci tvořícího sérii překážek proudu;
- $\sigma \leq 1,0$ světélkování.

4.2.2. Vlastní kavitační odolnost metodou SIGMA

Metoda SIGMA je experimentálním postupem pro učení katalogové hodnoty vlastního kavitačního indexu σ_v , viz rovnice (30).

Nejprve se stanoví kavitační index σ , viz rovnice (25), vypočtený při plném otevření a počátečních projevech kavitační eroze. K určení počátečního kavitačního opotřebení se užívá vibračně-akustické metody, která se kombinuje s demontáží a optickou kontrolou. Tato hodnota se obvykle bere jako referenční $\sigma = \sigma_r$.

Následně se podle rovnic (26) a (29) dopočítají koeficienty vlivu velikost (SSE) a tlaku (PSE). Ty vychází z referenčních parametrů pro armaturu se stejným C_v . [23] [24]

$$SSE = \left(\frac{d}{d_r}\right)^b \quad (26)$$

Kde:

d je průměr počítané armatury [m],

d_r je průměr referenční armatury [m],

b je opravný koeficient [1].

$$b = 0,068 \cdot \left(\frac{C_v}{d^2}\right)^{0,25} \quad (27)$$

Kde:

C_v je průtokový součinitel [1].

Hodnota C_v , viz rovnice (28), vyjadřuje množství US galonů vody 40-100°F teplé, která proteče armaturou za 1 minutu při tlakovém spádu 1PSI (1US galon=3,7854l, 1PSI=6894,8Pa).

$$C_v = \frac{Q}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho/\rho_0}{\Delta p}} \quad (28)$$

Kde:

ρ/ρ_0 je měrná hustota [1],

N_1 je číselná konstanta podle C) *Tabulka číselných konstant* [1].

$$PSE = \left[\frac{(p_1 - p_v)}{(p_1 - p_v)_r} \right]^x \quad (29)$$

Kde:

$(p_1 - p_v)_r$ jsou referenční hodnoty armatury se stejným C_v [Pa],

x je opravný koeficient [1].

Pro určení opravného koeficientu x se používá experimentálních měření [24]. V případě, kdy není známa hodnota opravného koeficientu x , je možné ji odhadnout podle tabulky v příloze B) *Experimentální data pro koeficient x*.

Konečná hodnota vlastního kavitačního indexu σ_v se stanoví na základě celkového přepočtu, viz rovnice (30).

$$\sigma_v = [\sigma_r \cdot SSE - 1] \cdot PSE + 1 \quad (30)$$

4.3. Měření

Bude stanoven kavitační index σ , viz rovnice (25). Pro jeho určení je nejprve třeba proměřit průtokové charakteristiky armatury při malých zdvích $z = 0,5; 1; 2; 5mm$.

Postup měření je následující.

- 1) Nastaví se zdvih armatury.
- 2) Změří a zaznamenají se průtočné parametry při $n = 600, 900, 1200, 1500min^{-1}$.

Naměřené průtokové charakteristiky jsou zaznamenány v tabulce v příloze F) *Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace*.

4.4. Vyhodnocení

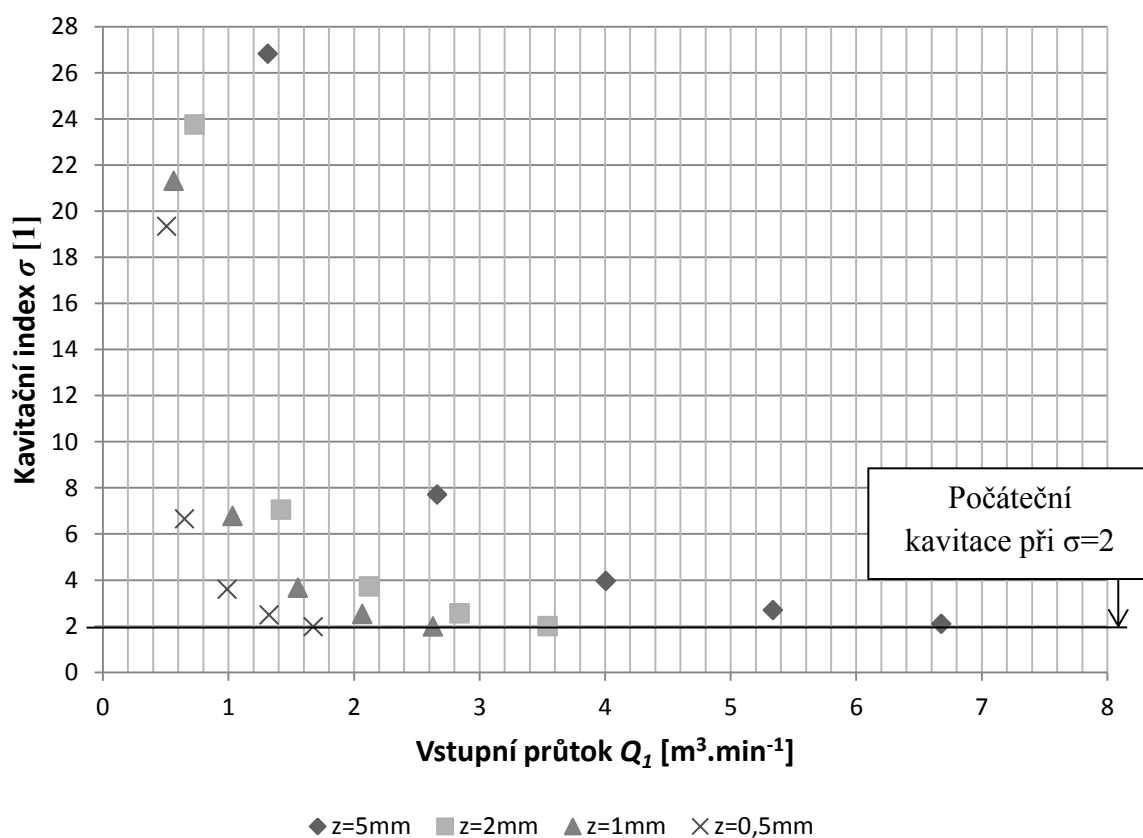
Jako referenční je brána hodnota $\sigma = 2$ pro počáteční kavitaci, viz kapitola 4.2.1 *Okamžitá kavitační odolnost regulační armatury*. Příklad výpočtu je vztažen k měření průtokové charakteristiky při $z = 0,5\text{mm}$ a $n = 1500\text{ min}^{-1}$. Výsledky jsou zaneseny v tabulce v příloze F) *Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace*.

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} = \frac{0,318 - (-0,993)}{0,318 - (-0,037)} = 1,97 \quad (31)$$

Kde:

p_v je relativní tlak sytých par při 18°C odpovídající $p_v = 99260,6\text{Pa}$.

Výsledky jsou zkruseny v *Obrázek 9 Závislost kavitačního indexu σ na vstupním průtoku Q_1* přičemž bylo dosaženo maximálně počáteční kavitace.



Obrázek 9 Závislost kavitačního indexu σ na vstupním průtoku Q_1

5. MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V REGULAČNÍ ARMATUŘE

5.1. Metoda konečných objemů

Numerická simulace proudění v armatuře je usnadněna nasazením počítačového programu FLUENT. Tento program využívá metody konečných objemů v následujících krocích.

- 1) Rozdělení oblasti na diskrétní objemy (buňky) užitím obecné křivočaré sítě.
- 2) Bilancování neznámých veličin v těchto buňkách a diskretizace.
- 3) Numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru.

Pro výpočet metodou konečných objemů je tedy třeba vytvořit vhodnou výpočetní síť.

5.2. Matematická definice turbulentního modelu k-ε standard

Pro řešení turbulentního proudění se vychází z metody časového zprůměrování Navier-Stokesových rovnic dle vztahu (32). Turbulentní model k-ε standard je potom charakteristický řešením rovnic (35), (37), (36) a (38). [25]

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (32)$$

Kde:

δ_{ij} je Kroneckerova delta [1].

Současně s Navier-Stokesovými rovnicemi je v síti řešena rovnice (33).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (33)$$

Reynoldsovův tenzor napětí v rovnici (32) a (34) je doplněn o Boussinesquovu hypotézu pro vyjádření lokálního stavu turbulence.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right) \quad (34)$$

Kde:

μ_t je turbulentní vírová viskozita [Pa.s].

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (35)$$

Kde:

$C_{1\varepsilon}$ je konstanta [1],

$C_{2\varepsilon}$ je konstanta [1],

$C_{3\varepsilon}$ je konstanta [1],

ε je rychlost disipace [$\text{m}^2.\text{s}^{-3}$],

σ_ε je Prandtlovo číslo pro rychlost disipace [1],

G_k je produkce turbulentní kinetické en. způsobená rychlost. gradienty [$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-3}$],

G_b je produkce turbulentní kinetické en. způsobená vztlakovou silou [$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-3}$],

S_ε je uživatelem definovaný zdrojový člen [$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-3}$].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (36)$$

Kde:

σ_k je Prandtlovo číslo pro turbulentní kinetickou energii [1],

Y_M je příspěvek fluktuační dilatace k celkové disipační rychlosti [$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-3}$],

S_K je uživatelem definovaný zdrojový člen [$\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-3}$].

$$\varepsilon \sim \frac{k^{3/2}}{L_t} \quad (37)$$

Kde:

L_t je délkové měřítko turbulentní oblasti [1],

k je turbulentní kinetická energie $k = 1/2\overline{u_i'u_i'}$.

$$\mu_t = \rho C_\mu L_t \sqrt{k} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (38)$$

Kde:

C_μ je konstanta [1].

5.3. Matematické modely kavitace

Program FLUENT rozlišuje tři kavitační modely (Singhalův, Zwart-Gerber-Belamri, Shnerr-Sauer). Všechny modely předpokládají minimálně dvoufázové proudění směsi voda s vodní párou a vychází Rayleigh-Plessetovy rovnice, viz rovnice (39). [26]

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_1} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_k}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma_B}{\rho_1 R} \quad (39)$$

Kde:

$p_B(t)$ je tlak v obklopující parní bublinu [Pa],

$p_\infty(t)$ je tlak v mnohonásobně velké vzdálenosti vzhledem k velikosti bubliny [Pa],

σ_B je povrchové napětí bubliny [Pa],

R je poloměr kavitačního jádra [1],

v_k je rychlost kapaliny obklopující parní bublinu [m.s⁻¹].

Současně je zohledněna transportní rovnice páry, viz rovnice (40). Jednotlivé kavitační modely se odlišují v přístupu ke stanovení R_e a R_c .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f_v) + \nabla(\rho_m f_v \bar{v}_v) = \nabla(\gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \quad (40)$$

Kde:

f_v je hmotnostní zlomek páry [1],

\bar{v}_v je vektor rychlosti parní fáze [-];

ρ_m je hustota směsi [kg.m⁻³],

R_e je efektivní součinitel výměny pro $p \leq p_{nasy}$ [1],

R_c je efektivní součinitel výměny pro $p \geq p_{nasy}$ [1].

5.3.1. Singhalův kavitační model

Singhalův kavitační model určuje efektivní součinitel výměny R_e pro $p \leq p_{nasy}$ na základě rovnice (41).

$$R_e = C_e \cdot \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_1 \rho_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{nasyc} - p)}{3 \rho_1} \cdot (1 - f_v)} \quad (41)$$

Kde:

p_{nasyc} je tlak nasycené směsi [Pa],

p je tlak obklopující parní bublinu [Pa].

V_{ch} je rychlost aproximovaná z lokální intenzity turbulence [m.s⁻¹],

C_e je empirická konstanta [1].

Efektivního součinitele výměny R_c pro $p \geq p_{nasyc}$ se určí na základě rovnice (42).

$$R_c = C_c \cdot \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_1 \rho_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{nasyc} - p)}{3 \rho_1} \cdot (f_v)} \quad (42)$$

Kde:

C_c je empirická konstanta [1].

5.3.2. Kavitační model Zwart-Gerber-Belamri

Kavitační model Zwart-Gerber-Belamri určuje efektivní součinitel výměny R_e pro $p \leq p_{nasyc}$ na základě rovnice (43).

$$R_e = F_v \cdot \frac{3 \alpha_{nukleač} \cdot (1 - \alpha) \rho_v}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p_{nasyc} - p)}{\rho_1}} \quad (43)$$

Kde:

F_v je odpařovací koeficient [1],

$\alpha_{nukleač}$ je nukleační objemový zlomek páry [1].

Efektivního součinitele výměny R_c pro $p \geq p_{nasyc}$ se určí na základě rovnice (44).

$$R_c = F_{kondenzač} \cdot \frac{3 \alpha \rho_v}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p - p_{nasyc}}{\rho_1}} \quad (44)$$

Kde:

$F_{kondenzač}$ je kondenzační koeficient [1].

5.3.3. Kavitační model Sherr-Sauer

Kavitační model Sherr-Sauer určuje efektivní součinitel výměny R_e pro $p \leq p_{nasy}$ na základě rovnice (45) a (43).

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_1}{\rho} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{3}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{nasy} - p}{\rho_1}} \quad (45)$$

Efektivního součinitel výměny R_c pro $p \geq p_{nasy}$ se určí na základě rovnice (46).

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_1}{\rho} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{3}{R_B} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p - p_{nasy}}{\rho_1}} \quad (46)$$

5.4. Příprava numerické simulace

5.4.1. Příprava výpočetní sítě

Pro numerickou simulaci jsem dle výkresů dodaných výrobcem armatury ARMATURY GROUP a.s. připravil model vnitřního prostoru armatury. Tento model je možné najít v příloze G) *Datový nosič CD-ROM* jako soubor ve formátu PRT.

Úpravou zdvihů armatury na hodnoty $z = 0,5; 1; 2; 5\text{mm}$ došlo ke vzniku příslušných modelů. Tyto modely jsou taktéž součástí přílohy G) *Datový nosič CD-ROM* jako soubory ve formátu PARASOLID (x_t).

Výpočetní síť byla navržena tak, aby v blízkosti stěny byla zajištěna přítomnost minimálně dvou buněk. Byl dodržen následující postup.

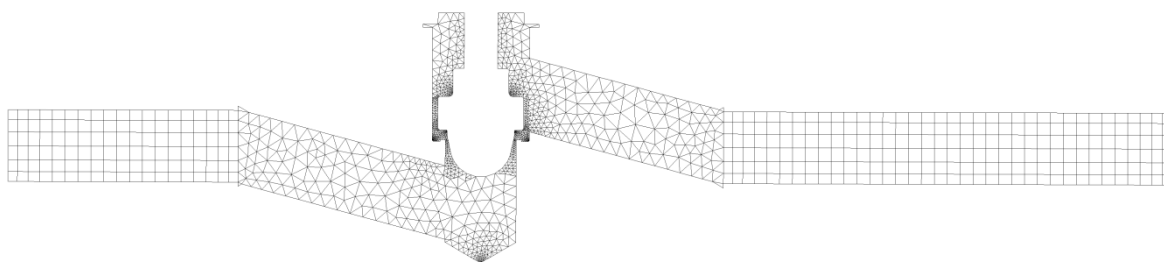
- 1) Rozdělení modelu na armaturu, vstupní a výstupní potrubí. Sloučení těchto objemů v jednu součást a aplikování příčné symetrie v programu ANSYS Design modeler.
- 2) Prvotní návrh výpočetní sítě v programu ANSYS Meshing.
- 3) Přizpůsobení výpočetní sítě v programu FLUENT

Nastavením příčné symetrie v programu ANSYS Design modeler bude docíleno zkrácení času potřebného pro výpočet. Proudění bude modelováno pouze v jedné polovině armatury, čemuž odpovídá poloviční počet buněk.

Prvotní síť byla vytvořena za použití základního nastavení programu ANSYS Meshing. Nástroji, které program nabízí, byl upraven pouze počet buněk na vstupu (31) a výstupu (29).

Výpočetní síť byla dále upravena nástrojem pro adaptaci sítě okolo kuželky. Došlo tak k zhuštění sítě, přičemž byla snaha o minimální počet dvou buněk v blízkosti obtékané stěny. Zhuštění je patrné z *Obrázek 10 Detail výpočetní sítě v podélném řezu pro $z=5mm$ při 195000 buňkách.*

V konečné fázi výpočetní sítě obsahují minimálně 195000 buněk pro $z = 5mm$ a maximálně 280000 buněk pro $z = 0,5mm$. Vytvořené sítě jsou složeny z čtyřstěnů v prostorách armatury, a dále kvádry ve vstupním a výstupním potrubí. Toto nastavení umožňuje provádění relativně rychlých výpočtů bez přehnaných nároků na výkon PC.



Obrázek 10 Detail výpočetní sítě v podélném řezu pro $z=5mm$ při 195000 buňkách

5.4.2. Okrajové podmínky a nastavení řešiče

Byla zvolena sada okrajových podmínek průtokový vstup a tlakový výstup. Hodnoty vstupující do okrajových podmínek pochází z průtokových charakteristik, viz *F) Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace.*

Okrajové podmínky jsou doplněny o adiabatickou stěnu a příčnou symetrii tak, jak je možné vidět na *Obrázek 11 Přiřazení okrajových podmínek FLUENT.*

Průtokový vstup byl zadán hodnotou Q_{ms} , dle případu. Přepočet této hodnoty ze známého průtoku Q_1 je dán vztahem (47).

Uvedený příklad výpočtu pro Q_{ms} , viz rovnice (48) a (49), vychází z měření průtokové charakteristiky při $z = 0,5\text{mm}$ a $n = 1500\text{ min}^{-1}$.

$$Q_{ms} = \frac{Q \cdot \rho}{3600 \cdot S} \quad (47)$$

Kde:

S je průměr vstupního potrubí [mm].

$$Q_{ms} = \frac{Q_1 \cdot \rho}{3600 \cdot S} = \frac{1,677 \cdot 998,2}{3600 \cdot 0,0012} = 401\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (48)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0384^2}{4} = 0,0012\text{ m}^2 \quad (49)$$

Tlakový výstup je definován naměřeným statickým relativním tlakem p_2 dle případu. Přítomnost dynamického tlaku $p_2 = p_{STATICKÝ} + p_{DYNAMICKÝ}$ při zadávání jsem pominul.

Dynamický tlak nabývá zanedbatelných hodnot s minimálním vlivem na výsledky simulace. Příklad výpočtu, viz rovnice (50), pro stejné podmínky jako rovnice (48) a (49).

$$p_{DYNAMICKÝ} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot 0,402^2 = 80\text{ Pa} \quad (50)$$

Kde:

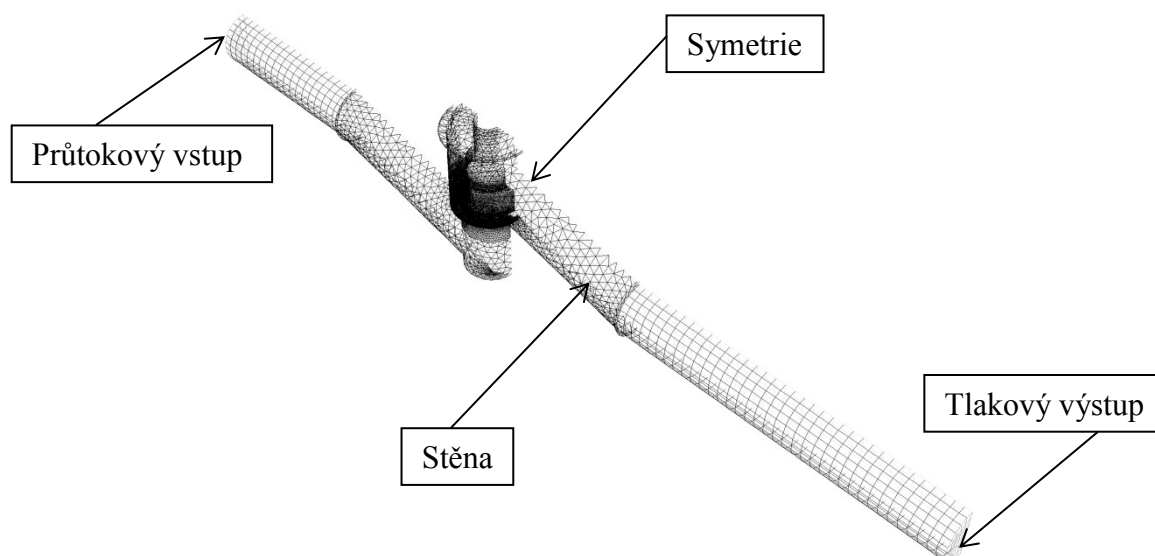
ρ je hustota vody při teplotě 27°C , která má hodnotu $\rho = 998,2\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Jelikož se v naměřených průtokových charakteristikách Reynoldsovo číslo vztažené ke vstupu do armatury pohybuje v rozmezí od $Re = 5000$ do $Re = 6200$, předpokládám nasazení turbulentního modelu proudění jako součástí řešiče.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (51)$$

Kde:

ν je viskozita vody při teplotě 27°C , která má hodnotu $\nu = 1 \cdot 10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 11 Přiřazení okrajových podmínek FLUENT

Jako médium pro simulaci byla zvolena voda z databáze programu FLUENT. Dále byl zvolen turbulentní model $k-\epsilon$ standard bez kavitačního modelu. Ostatní nastavení programu bylo ponecháno.

Příklad výpočtu Reynoldsova čísla, viz rovnice (52), pro stejné podmínky jako rovnice (48), (49) a (50).

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,402 \cdot 0,0384}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 15442 \quad (52)$$

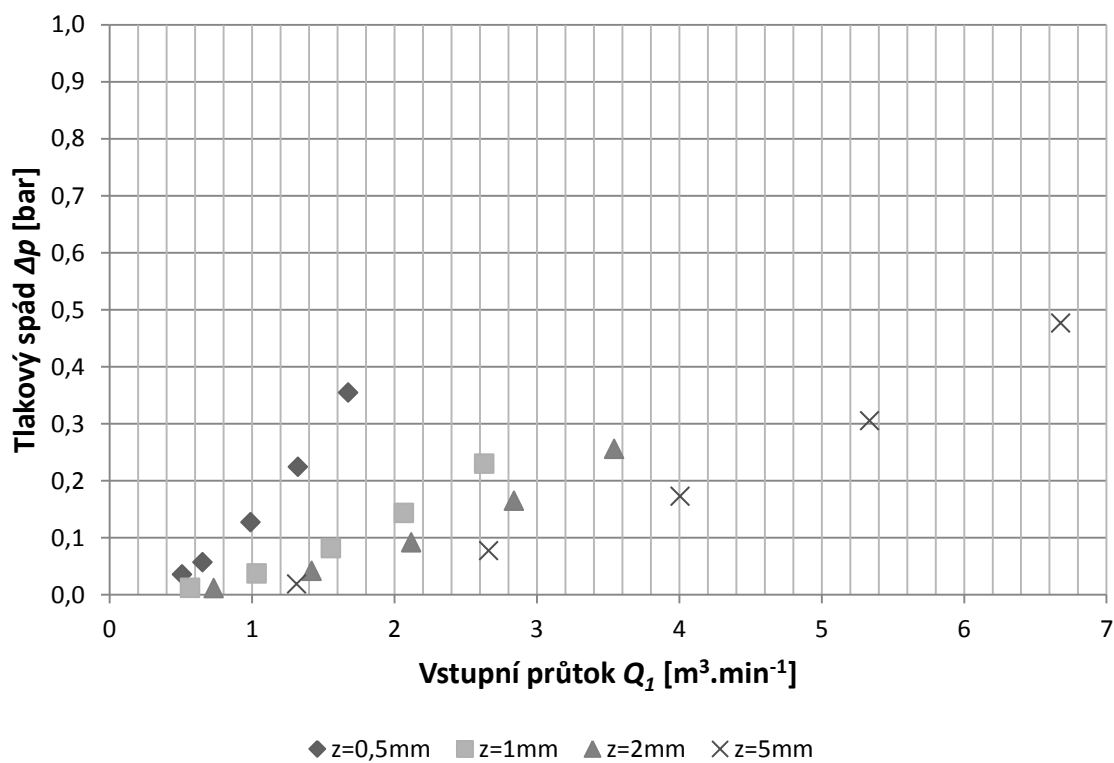
Kde:

v je rychlost proudění z rovnice spojitosti toku (53).

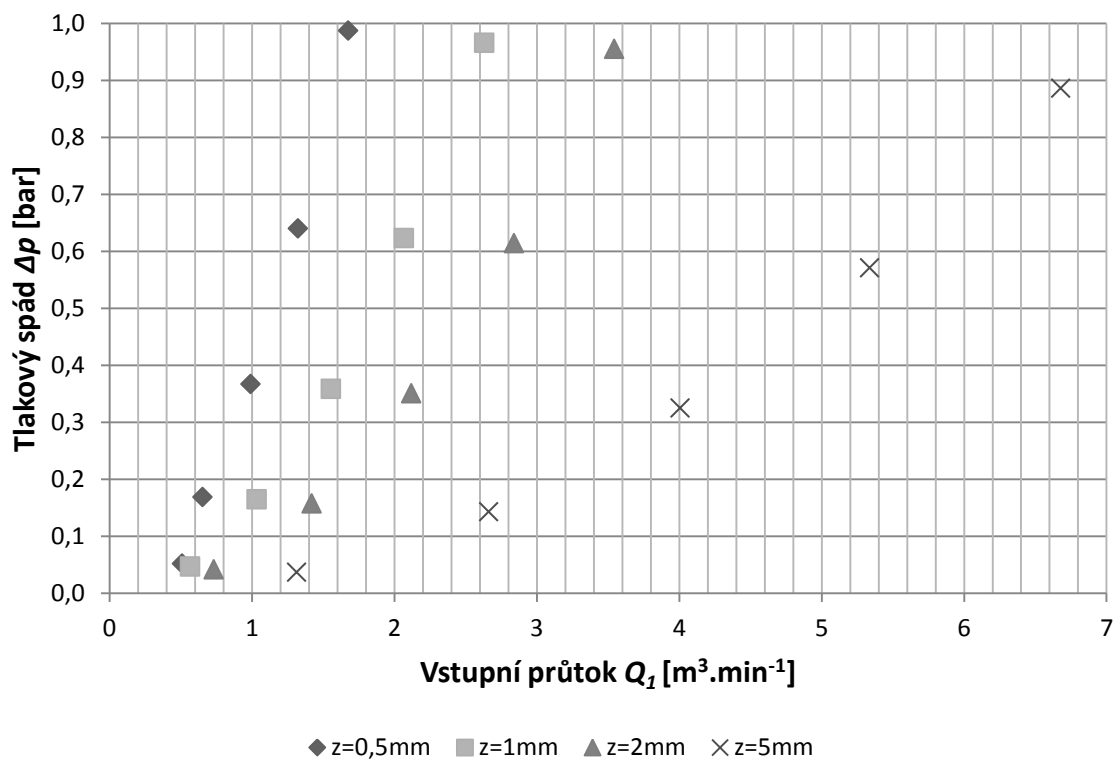
$$v = \frac{Q}{S} = \frac{1,677}{0,0012} = 0,402 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (53)$$

5.5. Vyhodnocení numerické simulace

Výsledky numerické simulace jsou zaznamenány tabulce v příloze F) *Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace*. Simulované průtokové charakteristiky jsou v závislostech na Obrázek 12 *Průtoková charakteristika ze simulace turbulentním modelem $k-\epsilon$* . Pro porovnání zde taktěž Obrázek 13 *Průtoková charakteristika získaná měřením*.

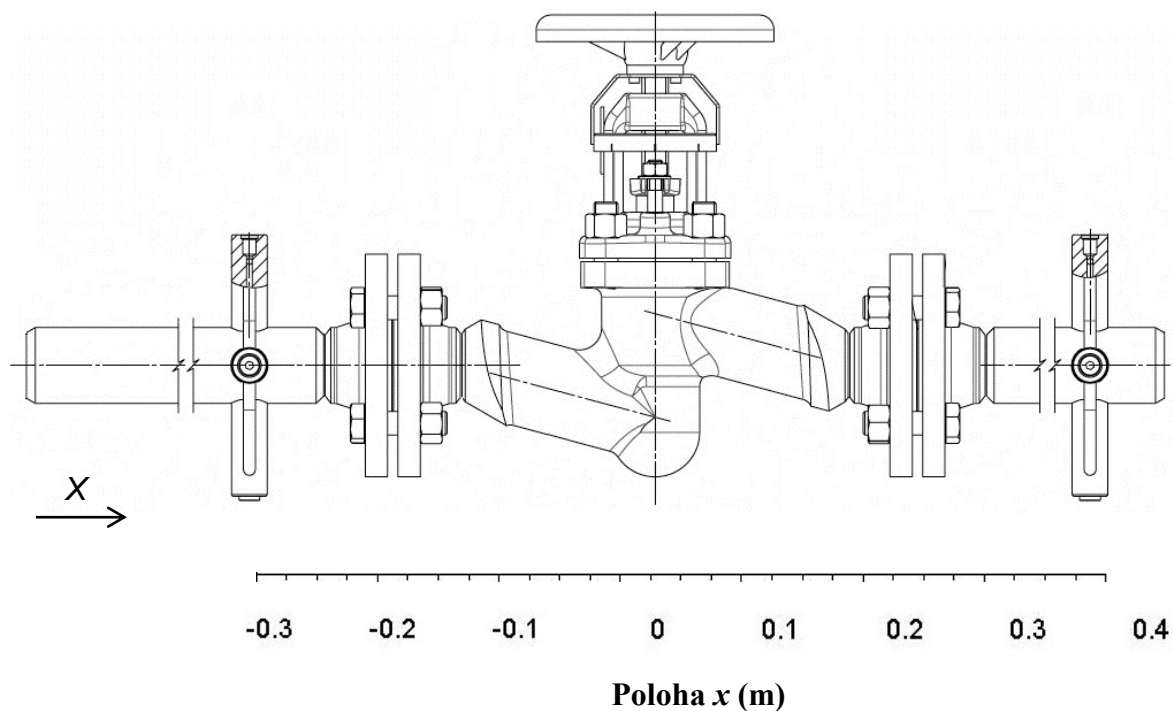


Obrázek 12 Průtoková charakteristika ze simulace turbulentním modelem $k-\varepsilon$

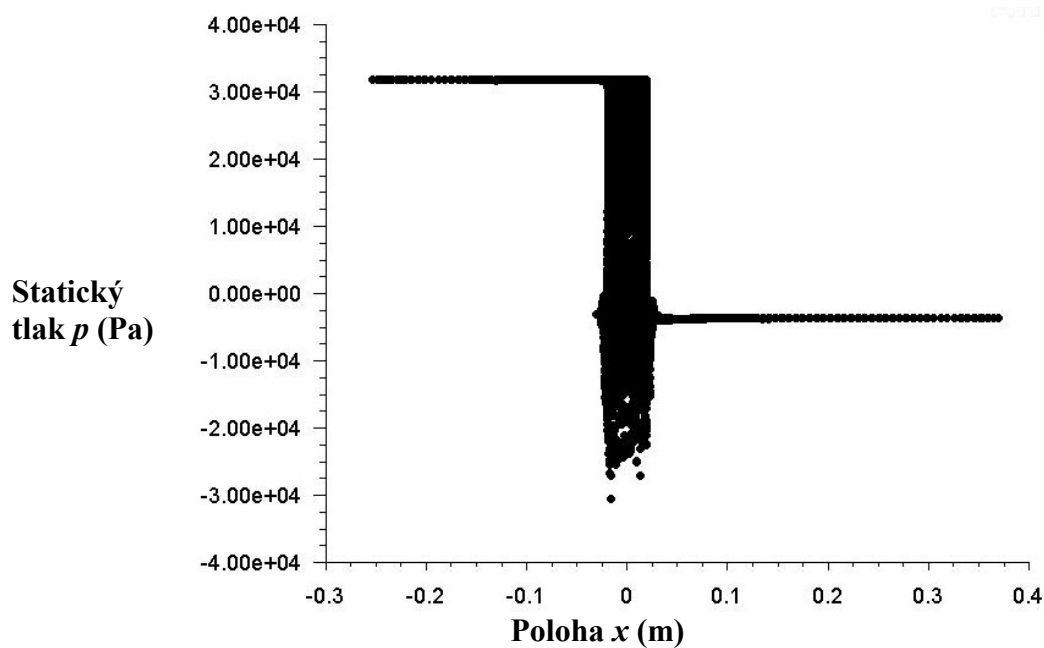


Obrázek 13 Průtoková charakteristika získaná měřením

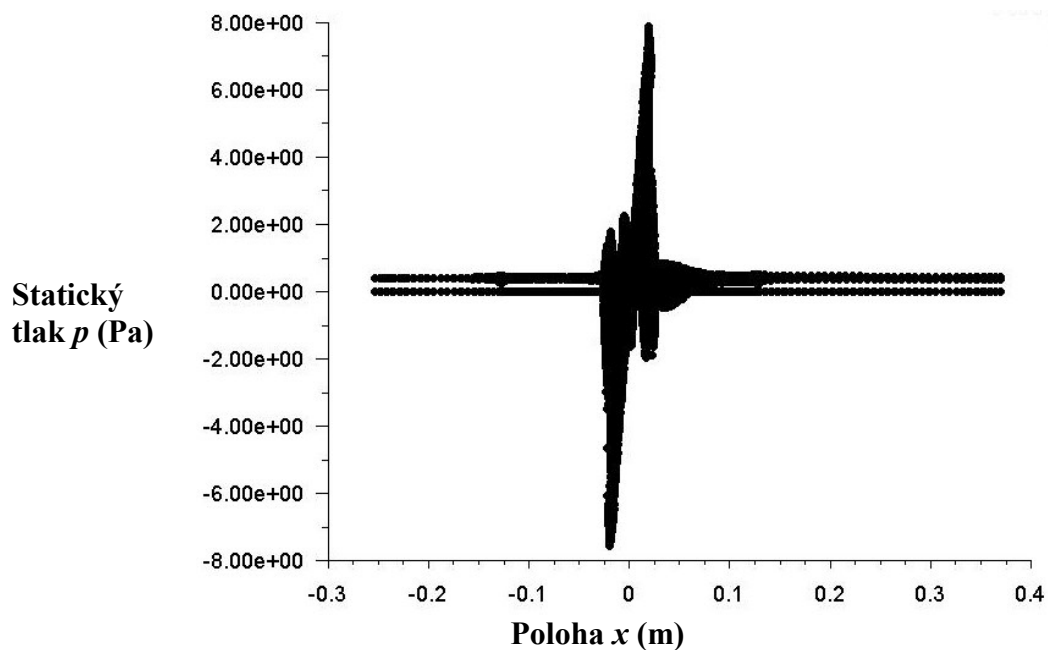
Tlak a rychlost v armatuře je zakreslena na *Obrázek 15 Rozložení statického tahu v armatuře při $z=0,5\text{mm}$ a 1500min^{-1}* a *Obrázek 16 Rozložení rychlosti ve směru X v armatuře při $z=0,5\text{mm}$ a 1500min^{-1}* .



Obrázek 14 Zkušební úsek v měřítku pro vyhodnocení výsledků simulace

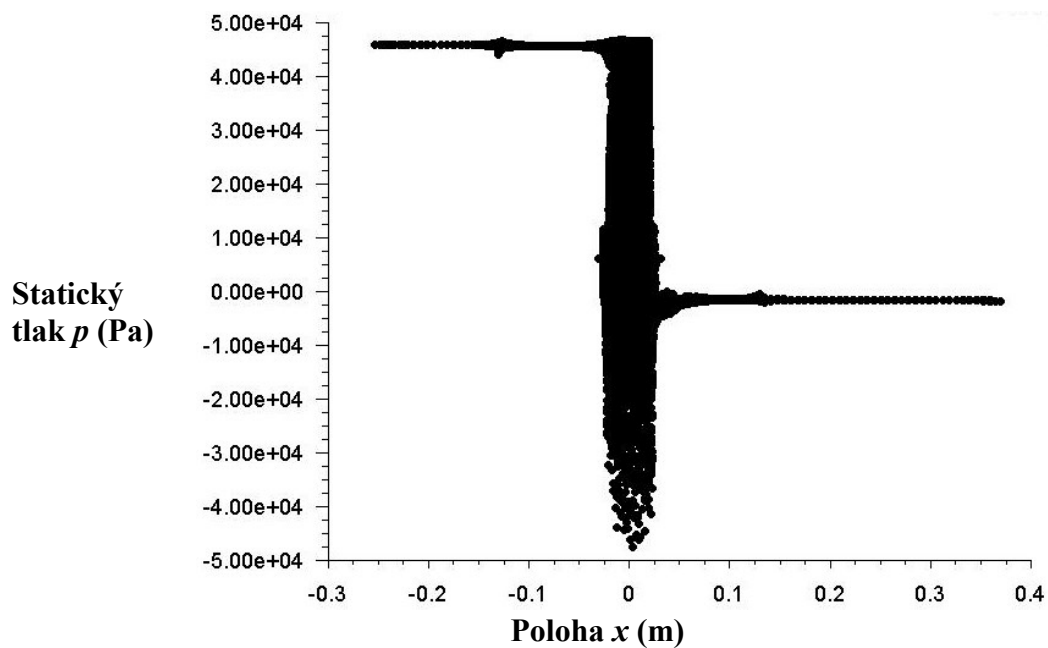


Obrázek 15 Rozložení statického tahu v armatuře při $z=0,5\text{mm}$ a 1500min^{-1}

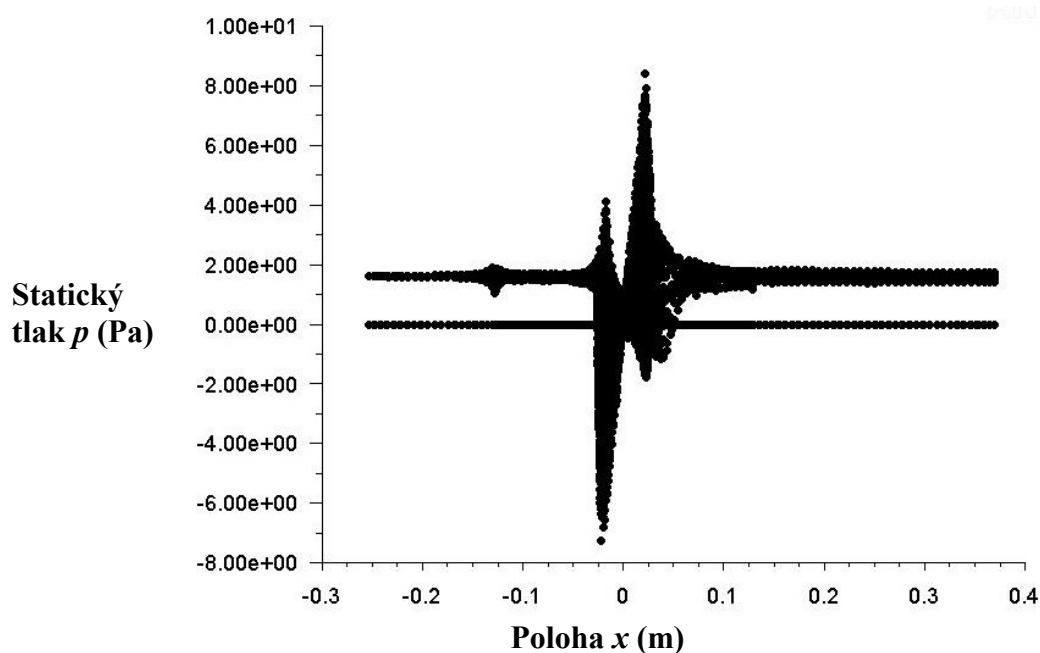


Obrázek 16 Rozložení rychlosti ve směru X v armatuře při $z=0,5\text{mm}$ a 1500min^{-1}

Pro porovnání jsou dále zakreslena rozložení tlaku a rychlosti, viz Obrázek 17 Rozložení statického tlaku v armatuře při $z=5\text{mm}$ a 1500min^{-1} a Obrázek 18 Rozložení rychlosti ve směru X v armatuře při $z=5\text{mm}$ a 1500min^{-1} .



Obrázek 17 Rozložení statického tlaku v armatuře při $z=5\text{mm}$ a 1500min^{-1}



Obrázek 18 Rozložení rychlosti ve směru X v armatuře při $z=5\text{mm}$ a 1500min^{-1}

V tabulce, viz příloha F) *Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace*, je současně zaznamenán minimální tlak zjištěný simulací v prostoru armatury.

Výsledný minimální tlak dle simulace je taktéž graficky vyhodnocen a zkreslen v závislosti $Q_1 - p_{\min}$, viz *Obrázek 13 Průtoková charakteristika získaná měřením*. Tento tlak v žádném z případů nedosáhl tlaku sytých par.

Příklad výpočtu, viz rovnice (54), je uveden pro $z = 0,5\text{mm}$ a $n = 1500 \text{ min}^{-1}$.

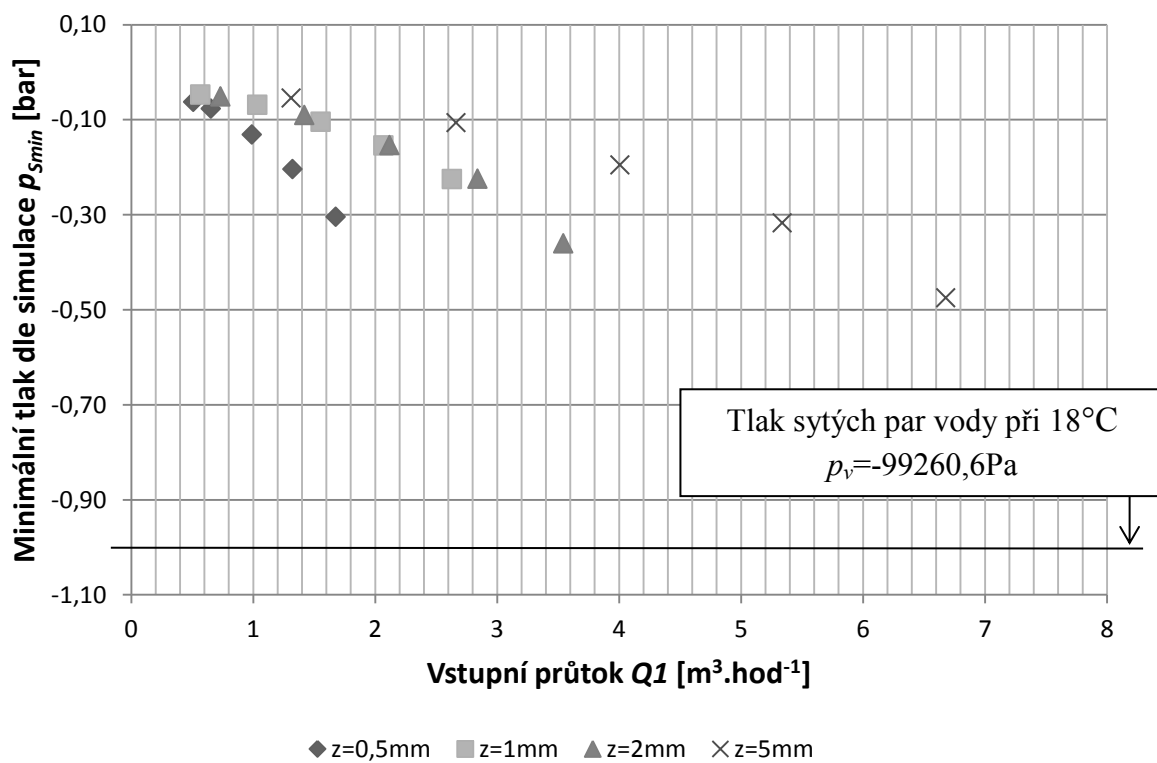
$$p_{\min} > p_v \quad (54)$$

Kde:

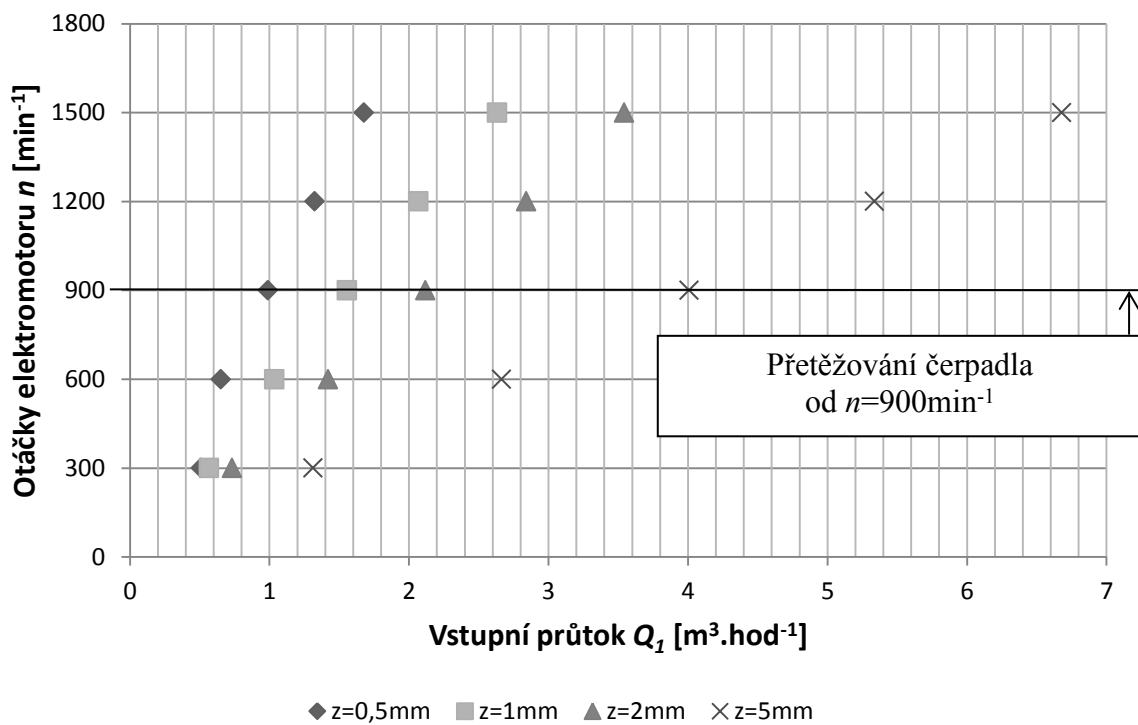
p_v je relativní tlak sytých par při 18°C odpovídající $p_v = -0,993 \text{ bar}$.

$$-0,304 \text{ bar} > -0,993 \text{ bar} \quad (55)$$

Pro názornost je zde zkreslena závislost $Q_1 - n$, viz *Obrázek 20 Přetěžování čerpadla NZ-3-165-S při měření průtokových charakteristik*, s vyznačenou hranicí přetěžování.



Obrázek 19 Minimální tlak dosažený v průběhu simulace



Obrázek 20 Přetěžování čerpadla NZ-3-165-S při měření průtokových charakteristik

6. ZÁVĚR

Změřil jsem součinitel regenerace tlaku F_L , který vyšel v rozsahu $F_L = 1,016$ až $F_L = 1,025$, viz *Obrázek 8 Charakteristika $FL(z)$ naměřená při $n=1650\text{min}^{-1}$* .

Současně jsem změřil průtočné charakteristiky při malých zdvizích $z = 0,5; 1; 2; 5\text{mm}$, viz *Obrázek 13 Průtoková charakteristika získaná měřením*. Vyhodnocení kavitačního indexu σ z průtokových zkoušek, viz *Obrázek 9 Závislost kavitačního indexu σ na vstupním průtoku QI* , ukazuje na dosažení počáteční kavitace při krátkodobém přetěžování čerpadla NZ-3-165-S na $n = 1500\text{min}^{-1}$.

Z porovnání *Obrázek 12 Průtoková charakteristika ze simulace turbulentním modelem $k-\epsilon$* a *Obrázek 13 Průtoková charakteristika získaná měřením* vyplývá, že nebylo dosaženo shody simulace z měření. Vyhodnocení minimálního tlaku v modelovaném proudění armaturou, viz *Obrázek 19 Minimální tlak dosažený v průběhu simulace*, přítomnost kavitace neprokázalo. Příčina rozdílných výsledků není patrná a může být způsobena některou z následujících nepřesností:

- a) nepřesným nastavením řešiče při numerickém modelování;
- b) nepřesným nastavením zdvihu, který byl nastavován manuálně na zkušebním úseku;
- c) nepřesným měřením způsobeným znečištěnou kapalinou částicemi z velmi starého čerpadla typu NZ-3-165-S;
- d) přetěžováním čerpadla NZ-3-165-S od $n = 900\text{ min}^{-1}$;
- e) kumulací výše zmíněných nepřesností.

Další možnost zpřesnění měření je nahrazení čerpadla NZ-3-165-S výkonnějším typem jehož provoz nebude spojen s přítomností nečistot v kapalině zkušebního obvodu. S výkonnějším čerpadlem je možné očekávat schopnost měřit proudění regulační armaturou při jiných kavitačních fázích, než pouze počáteční kavitaci.

Jako nejpravděpodobnější příčina rozdílných průtokových charakteristik simulace a měření, se jeví kumulace všech zmíněných nepřesností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LI, S. C. *Cavitation of Hydraulic Machinery*. Londýn: Imperial College Press, 2000. 492 s. ISBN 978-1-86094-257-0
- [2] KOLEKTIV. *Regulační armatury 4. Upravené a doplněné vydání*. Česká Třebová: LDM spol. s r.o., 2006. 168s.
- [3] UNIVERSITY OF WARWICK, UK. *An Introduction to Cavitation Fundamentals* [Citováno 11-4-2014].
<<http://authors.library.caltech.edu/28373/1/BRE252.pdf>>
- [4] HAAR, Lester; GALLAGHER, John; KELL, George; *NBR/NRC Steam Tables*. V New Yorku: Hemisphere Publishing Corp, 1984. 400s. ISBN 0-89116-353-0
- [5] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. V Praze: SNTL, 1989. 332s. ISBN 80-03-00206-0
- [6] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Vlastnosti tekutin* [Citováno 11-4-2014].
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>>
- [7] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. V Praze: NČSAV, 1969. 278s. ISBN 509-21-875
- [8] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Měření povrchového napětí z kapilární elevace* [Citováno 11-4-2013].
<http://if.vsb.cz/Veda/foto1/povrchove_napeti.pdf>
- [9] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *7. Tenze par* [online]. [Citováno 10-11-2014]
<http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/Skripta_kap_07.pdf>
- [10] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *10. Balance entalpie* [online]. [Citováno 10-11-2014]
<<http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k10.bilance.entalpie.pdf>>
- [11] *Flowserve Cavitation Control*. Ve Spojených státech amerických: Flowserve, 2009. 20s. FCD FCENBR0068-01

- [12] MACHINERY LUBRICATION. *Failure Analzsis for Plain Bearings*
[Citováno 11-4-2014].
<<http://www.machinerylubrication.com/Read/638/failure-analysis-bearings>>
- [13] ALL FOR POWER. *Kavitace regulačních ventilů, vyhodnocení poškození*
[Citováno 11-4-2014].
<<http://www.allforpower.cz/clanek/kavitace-regulacnich-ventilu-vyhodnoceni-poskozeni/>>
- [14] BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; TARABA, Oldřich. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. V Praze: SNTL, 1981. 332s.
DT 621.224.004:532.528
- [15] *Anti-Cavitation Trim*. V Kanadě: Singer Valve, 2013. 12s. FSC® C014956
- [16] PARISH, Jeff. Controlling Cavitation: How a Deeper Understanding Improves the Solution. *Valve Magazine*. 2009. 52s. ISSN 1057-2819
- [17] EMERSON. *Valve Sizing Calcuation (Traditional and Standardized Method)*
[Citováno 15-4-2014].
<http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/referece/d351798x012_11.pdf>
- [18] THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE PROPERTIES OF WATER AND STEAM. *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for Thermodynamic Properties of Water and Steam*. Ve Švýcarsku: IAPWS, 2007. 49s. IAPWS-IF97
- [19] EMERSON. *Control Valve Handbook- 4th Edition*. Ve Spojených státech amerických: Fisher Controls International LLC, 2005. 297s. D101881X012
- [20] ČSN EN 60534-2-3 *Regulační armatury pro průmyslové procesy – Část 2-3: Průtok – Zkušební postupy*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 26s.
- [21] *IEC 60534-8-1 Industrial-proces Control Valves- Part 8-1: Noise Considerations- Laboratory Measurement of Noise Generated by Aerodynamic Flow Through Control Valves*. V Ženevě: International Electrotechnical Commision, 2005. 35s.

- [22] *Improvement of IEC 60534-8-3 Standard for Noise Prediction in Control Valves*. Ve Frankfurtu nad Mohanem: Samson, 2008. 12s. WA 195 EN
- [23] DRESSER MASONILAN. *Control Valve Cavitation, Damage Control* [Citováno 12-4-2014].
<http://sevco.fwwebb.com/_build/docs/ControlValveCavitation.pdf>
- [24] TULLIS, Paul. *Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. V Kanadě: John Wiley & Sons, Inc. 1989. 288s. ISBN 978-0471832850
- [25] SHARIF UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *Turbulence Modeling* [Citováno 8-5-2014].
<<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.petrodanesh.ir%2FVirtual%2520Education%2FMechanics%2FANSYS-FLUENT%2FANSYS%2520CO%2Ffluent12-lecture06-turbulence.ppsx&ei=M11rU4ybJq6y7AbSm4CADA&usg=AFQjCNGG7yzs2ORc2GgdeQuVfCHxGnL1mw>>
- [26] BÍLÝ, Daniel. *Matematické modelování vzniku a vývoje kavitace v jednoduchém prvku*. V Ostravě: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita VŠB-TUO, Fakulta strojní, 2010. 70s. Diplomová práce.

SEZNAM PŘÍLOH

- A) Hodnoty tlaku sytých par v teplotním rozmezí 0-350 °C*
- B) Experimentální data pro koeficient x*
- C) Tabulka číselných konstant*
- D) Náskres zkušebního úseku*
- E) Tabulka měření součinitele regenerace tlaku*
- F) Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace*
- G) Datový nosič CD-ROM*

PŘÍLOHY

A) Hodnoty tlaku sytých par v teplotním rozmezí 0-350 °C

Tabulka 2 Hodnoty tlaku sytých par při dané teplotě (0-350 °C) [4]

t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]
0	0,61129	89	67,496	178	956,66	267	5246,3
1	0,65716	90	70,117	179	979,09	268	5329,8
2	0,70605	91	72,823	180	1001,9	269	5414,3
3	0,75813	92	75,614	181	1025,2	270	5499,9
4	0,81359	93	78,494	182	1048,9	271	5586,4
5	0,8726	94	81,465	183	1073	272	5674
6	0,93537	95	84,529	184	1097,5	273	5762,7
7	1,0021	96	87,688	185	1122,5	274	5852,4
8	1,073	97	90,945	186	1147,9	275	5943,1
9	1,1482	98	94,301	187	1173,8	276	6035
10	1,2281	99	97,759	188	1200,1	277	6127,9
11	1,3129	100	101,32	189	1226,9	278	6221,9
12	1,4027	101	104,99	190	1254,2	279	6317
13	1,4979	102	108,77	191	1281,9	280	6413,2
14	1,5988	103	112,66	192	1310,1	281	6510,5
15	1,7056	104	116,67	193	1338,8	282	6608,9
16	1,8185	105	120,79	194	1368	283	6708,5
17	1,938	106	125,03	195	1397,6	284	6809,2
18	2,0644	107	129,39	196	1427,8	285	6911,1
19	2,1978	108	133,88	197	1458,5	286	7014,1
20	2,3388	109	138,5	198	1489,7	287	7118,3
21	2,4877	110	143,24	199	1521,4	288	7223,7
22	2,6447	111	148,12	200	1553,6	289	7330,2
23	2,8104	112	153,13	201	1586,4	290	7438
24	2,985	113	158,29	202	1619,7	291	7547
25	3,169	114	163,58	203	1653,6	292	7657,2
26	3,3629	115	169,02	204	1688	293	7768,6
27	3,567	116	174,61	205	1722,9	294	7881,3
28	3,7818	117	180,34	206	1758,4	295	7995,2
29	4,0078	118	186,23	207	1794,5	296	8110,3
30	4,2455	119	192,28	208	1831,1	297	8226,8
31	4,4953	120	198,48	209	1868,4	298	8344,5
32	4,7578	121	204,85	210	1906,2	299	8463,5
33	5,0335	122	211,38	211	1944,6	300	8583,8
34	5,3229	123	218,09	212	1983,6	301	8705,4
35	5,6267	124	224,96	213	2023,2	302	8828,3
36	5,9453	125	232,01	214	2063,4	303	8952,6
37	6,2795	126	239,24	215	2104,2	304	9078,2
38	6,6298	127	246,66	216	2145,7	305	9205,1
39	6,9969	128	254,25	217	2187,8	306	9333,4
40	7,3814	129	262,04	218	2230,5	307	9463,1
41	7,784	130	270,02	219	2273,8	308	9594,2
42	8,2054	131	278,2	220	2317,8	309	9726,7

t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]	t [°C]	p_v [kPa]
43	8,6463	132	286,57	221	2362,5	310	9860,5
44	9,1075	133	295,15	222	2407,8	311	9995,8
45	9,5898	134	303,93	223	2453,8	312	10133
46	10,094	135	312,93	224	2500,5	313	10271
47	10,62	136	322,14	225	2547,9	314	10410
48	11,171	137	331,57	226	2595,9	315	10551
49	11,745	138	341,22	227	2644,6	316	10694
50	12,344	139	351,09	228	2694,1	317	10838
51	12,97	140	361,19	229	2744,2	318	10984
52	13,623	141	371,53	230	2795,1	319	11131
53	14,303	142	382,11	231	2846,7	320	11279
54	15,012	143	392,92	232	2899	321	11429
55	15,752	144	403,98	233	2952,1	322	11581
56	16,522	145	415,29	234	3005,9	323	11734
57	17,324	146	426,85	235	3060,4	324	11889
58	18,159	147	438,67	236	3115,7	325	12046
59	19,028	148	450,75	237	3171,8	326	12204
60	19,932	149	463,1	238	3228,6	327	12364
61	20,873	150	475,72	239	3286,3	328	12525
62	21,851	151	488,61	240	3344,7	329	12688
63	22,868	152	501,78	241	3403,9	330	12852
64	23,925	153	515,23	242	3463,9	331	13019
65	25,022	154	528,96	243	3524,7	332	13187
66	26,163	155	542,99	244	3586,3	333	13357
67	27,347	156	557,32	245	3648,8	334	13528
68	28,576	157	571,94	246	3712,1	335	13701
69	29,852	158	586,87	247	3776,2	336	13876
70	31,176	159	602,11	248	3841,2	337	14053
71	32,549	160	617,66	249	3907	338	14232
72	33,972	161	633,53	250	3973,6	339	14412
73	35,448	162	649,73	251	4041,2	340	14594
74	36,978	163	666,25	252	4109,6	341	14778
75	38,563	164	683,1	253	4178,9	342	14964
76	40,205	165	700,29	254	4249,1	343	15152
77	41,905	166	717,83	255	4320,2	344	15342
78	43,665	167	735,7	256	4392,2	345	15533
79	45,487	168	753,94	257	4465,1	346	15727
80	47,373	169	772,52	258	4539	347	15922
81	49,324	170	791,47	259	4613,7	348	16120
82	51,342	171	810,78	260	4689,4	349	16320
83	53,428	172	830,47	261	4766,1	350	16521
84	55,585	173	850,53	262	4843,7	351	16725
85	57,815	174	870,98	263	4922,3	352	16931
86	60,119	175	891,8	264	5001,8	353	17138
87	62,499	176	913,03	265	5082,3	354	17348
88	64,958	177	934,64	266	5163,8	355	17561

B) Experimentální data pro koeficient x

Tabulka 3 Experimentální data pro stanovení opravného koeficientu x [24]

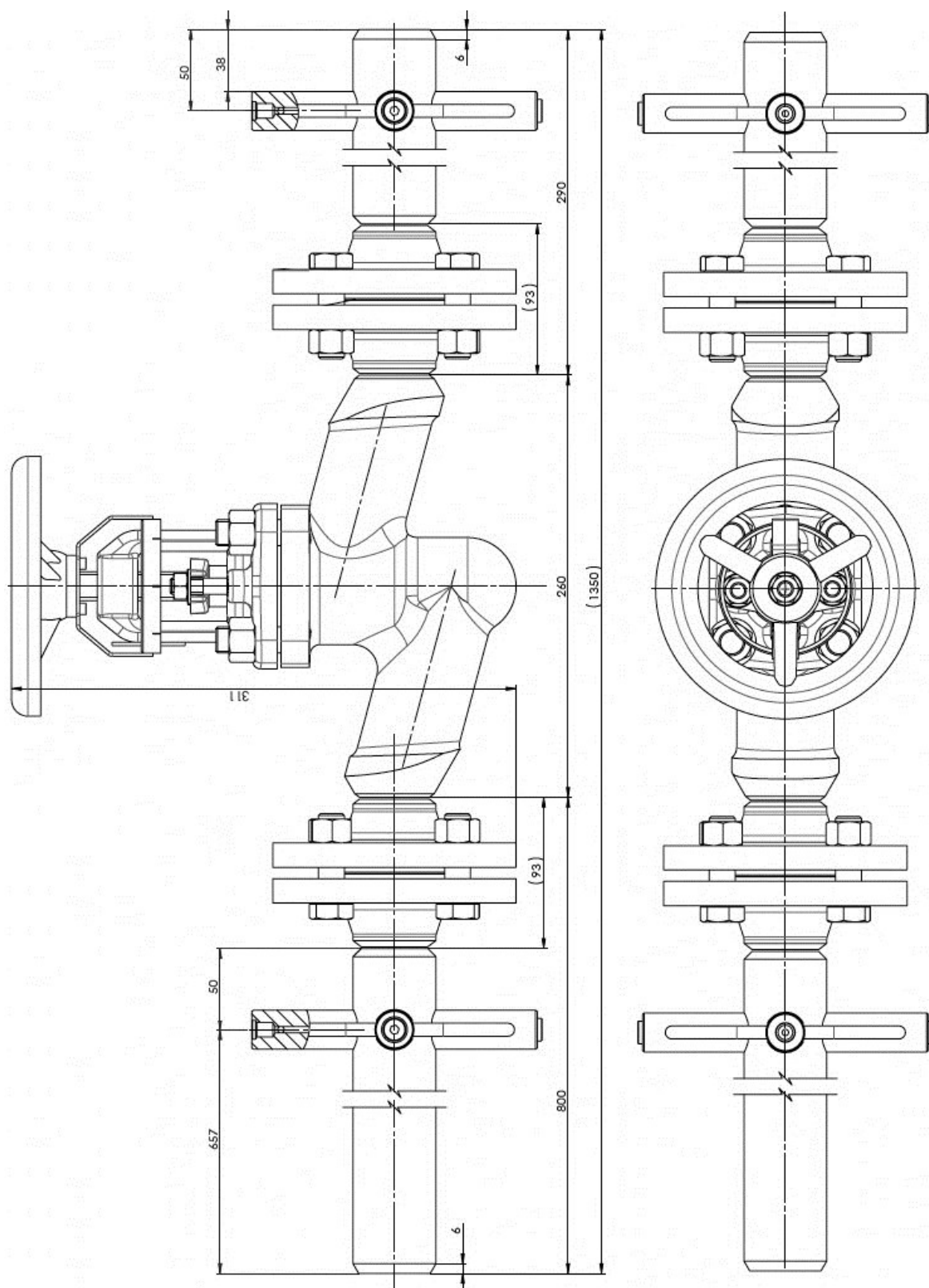
Typ armatury	Koeficient x [1]	Tlakový rozsah
4" klapka	0,28	120-660kPa
6" klapka	0,28	140-1310kPa
12" klapka	0,28	120-1200kPa
12" klapka	0,28	100-930kPa
12" klapka	0,24	80-930kPa
20" klapka	0,3	70-550kPa
24" klapka	0,24	150-740kPa
2" kuželka	0,3	120-1700kPa
8" kuželka	0,28	50-1030kPa
12" kuželka	0,24	100-620kPa
16" kulový kohout	0,14	450-1340kPa
8" Peltonova jehla	0,14	450-1030kPa

C) Tabulka číselných konstant

Tabulka 4 Číselné konstanty [19]

		N	w	Q	p	ρ	T	d, D
N_1		0,0865	-	Nm ³ /h	kPa	-	-	-
		0,865	-	Nm ³ /h	bar	-	-	-
		1,00	-	GPM	psia	-	-	-
N_2		0,00214	-	-	-	-	-	mm
		890	-	-	-	-	-	"
N_5		0,00241	-	-	-	-	-	mm
		1000	-	-	-	-	-	"
N_6		2,73	kg/h	-	kPa	kg/m ³	-	-
		27,3	kg/h	-	bar	kg/m ³	-	-
		63,3	lb/h	-	psia	lb/ft ³	-	-
N_7	$T = 0^{\circ}\text{C}$	3,94	-	Nm ³ /h	kPa	-	K	-
		394	-	Nm ³ /h	bar	-	K	-
	$T = 16^{\circ}\text{C}$	4,17	-	Nm ³ /h	kPa	-	K	-
N_8		417	-	Nm ³ /h	bar	-	K	-
	$T = 60^{\circ}\text{F}$	1360	-	SCFH	psia	-	°R	-
N_9		0,948	kg/h	-	kPa	-	K	-
		94,8	kg/h	-	bar	-	K	-
		19,3	lb/h	-	psia	-	°R	-
N_9	$T = 0^{\circ}\text{C}$	21,2	-	Nm ³ /h	kPa	-	K	-
		2120	-	Nm ³ /h	bar	-	K	-
	$T = 16^{\circ}\text{C}$	22,4	-	Nm ³ /h	kPa	-	K	-
N_9		2240	-	Nm ³ /h	bar	-	K	-
	$T = 60^{\circ}\text{F}$	7320	-	SCFH	psia	-	°R	-

D) Nákres zkušebního úseku



Obrázek 21 Nákres zkušebního úseku

E) Tabulka měření součinitele regenerace tlaku

Tabulka 5 Měření součinitele regenerace tlaku

n [min ⁻¹]	z [mm]	p_{11} [bar]	p_{12} [bar]	Δp_1 [bar]	Q_1 [m ³ .h ⁻¹]	p_{21} [bar]	p_{22} [bar]	Δp_2 [bar]	Q_2 [m ³ .h ⁻¹]	$((Q_1-Q_2)/Q_1).100$ [%]	C_V [1]	F_L [1]
1650	0,5	1,152	-0,037	1,189	1,1785	1,138	0,052	1,089	1,727	3,2	1,892	1,025
	1	1,134	-0,034	1,168	2,8151	1,135	0,080	1,055	2,707	3,8	3,011	1,024
	2	1,111	-0,027	1,138	3,9531	1,131	0,099	1,022	3,669	7,2	4,284	1,021
	5	1,049	-0,014	1,063	7,3481	1,061	0,096	0,965	6,949	5,4	8,239	1,016
n [min ⁻¹]	z [mm]	Δp [bar]	Q_1 [m ³ .h ⁻¹]									
1500	0,5	0,988	1,166	1,661	1,661	1,660	1,659	1,654	1,651	1,647	1,643	1,641
		0,888	1,538	1,541	1,545	1,542	1,540	1,541	1,542	1,544	1,551	1,555
		1,189	1,793	1,788	1,784	1,783	1,787	1,790	1,784	1,787	1,776	1,777
		1,086	1,726	1,724	1,729	1,734	1,730	1,732	1,733	1,724	1,725	1,718
1500	1	0,967	2,606	2,603	2,618	2,609	2,614	2,609	2,609	2,607	2,601	2,559
		0,876	2,484	2,482	2,454	2,485	2,454	2,482	2,483	2,481	2,485	2,489
		1,168	2,818	2,82	2,716	2,820	2,816	2,814	2,818	2,813	2,809	2,804
		1,055	2,728	2,711	2,706	2,704	2,702	2,702	2,703	2,701	2,705	2,709
1500	2	0,946	3,565	3,569	3,569	3,340	3,566	3,565	3,559	3,557	3,552	3,557
		0,854	3,371	3,366	3,358	3,357	3,353	3,356	3,357	3,358	3,360	3,362
		1,138	3,952	3,95	3,954	3,954	3,956	3,957	3,953	3,948	3,955	3,952
		1,022	3,680	3,648	3,648	3,672	2,669	3,666	3,664	3,663	3,662	3,660
1500	5	0,884	6,647	6,646	6,641	6,640	6,644	6,650	6,656	6,659	6,665	6,668
		0,788	6,332	6,321	6,320	6,323	6,32	6,319	6,319	3,617	6,322	6,315
		1,063	7,352	7,349	7,353	7,349	7,344	7,341	7,346	7,345	7,348	7,354
		0,965	6,971	6,949	6,940	6,944	6,967	6,970	6,947	6,934	6,932	6,934

F) Tabulka měření charakteristik a výsledky simulace

Tabulka 6 měření charakteristik a výsledky simulace

Naměřené průtokové charakteristiky regulační armatury										Simulace turbulentním modelem k-ε				
n [min ⁻¹]	z [mm]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	Δp [bar]	QI [m ³ ·h ⁻¹]	v [m·s ⁻¹]	Re [1]	σ [1]	Q_{ms} [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	p_{s1} [bar]	p_{s2} [bar]	Δp_s [bar]	p_{smin} [bar]	
1500	0,5	0,950	-0,037	0,987	1,677	0,402	15442	1,97	401	0,318	-0,037	0,355	-0,304	
1200		0,602	-0,038	0,640	1,324	0,318	12193	2,49	317	0,187	-0,038	0,225	-0,204	
900		0,328	-0,039	0,367	0,990	0,237	9116	3,60	237	0,088	-0,039	0,127	-0,131	
600		0,131	-0,038	0,169	0,652	0,156	6007	6,65	156	0,019	-0,038	0,057	-0,077	
300		0,013	-0,039	0,052	0,510	0,122	4693	19,34	122	-0,003	-0,039	0,036	-0,062	
1500	1	0,932	-0,034	0,966	2,631	0,631	24230	1,99	630	0,196	-0,034	0,230	-0,225	
1200		0,587	-0,036	0,623	2,067	0,496	19038	2,54	495	0,108	-0,036	0,144	-0,154	
900		0,322	-0,037	0,359	1,554	0,373	14318	3,66	372	0,045	-0,037	0,082	-0,104	
600		0,126	-0,039	0,165	1,034	0,248	9523	6,78	248	-0,001	-0,039	0,038	-0,069	
300		0,009	-0,038	0,047	0,566	0,136	5211	21,31	135	-0,026	-0,038	0,012	-0,047	
1500	2	0,924	-0,031	0,955	3,543	0,850	32633	2,01	848	0,225	-0,031	0,256	-0,360	
1200		0,581	-0,033	0,614	2,840	0,681	26157	2,56	680	0,132	-0,033	0,165	-0,224	
900		0,315	-0,036	0,351	2,119	0,508	19512	3,73	507	0,056	-0,036	0,092	-0,153	
600		0,131	-0,037	0,158	1,419	0,340	13072	7,05	340	0,005	-0,037	0,042	-0,090	
300		0,005	-0,037	0,042	0,731	0,175	6732	23,75	175	-0,025	-0,037	0,012	-0,050	
1500	5	0,869	-0,017	0,886	6,679	0,1602	61511	2,10	1599	0,460	-0,017	0,477	-0,475	
1200		0,546	-0,025	0,571	5,338	1,280	49163	1,69	1278	0,281	-0,025	0,306	-0,317	
900		0,294	-0,031	0,325	4,007	0,961	36910	3,96	959	0,142	-0,031	0,173	-0,195	
600		0,109	-0,034	0,143	2,663	0,639	24530	7,70	638	0,043	-0,034	0,077	-0,106	
300		0,000	-0,037	0,037	1,313	0,315	12092	26,83	314	-0,018	-0,037	0,019	-0,054	